

Boreaaliset puut metaanin lähteenä kasvukauden alussa

likka Haikarainen
Pro gradu -tutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden laitos
Metsien ekologia ja
käyttö
5 / 2016

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author Iikka Haikarainen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Boreaaliset puut metaanin lähteenä kasvukauden alussa			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö, metsä- ja su ekosysteemien hoito ja ennallistaminen			
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu	Aika/Datum – Month and year 2016	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 62 s.	
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Metaani (CH₄) on yksi tärkeimmistä kasvihuonekaasusta. Sen ilmastoa lämmittävä vaikutus on 100 vuoden lämmityspotentiaalina 28-kertainen hiilidioksidiin verrattuna. Lisäksi metaanin määrä ilmakehässä on yli kaksinkertaistunut esiteollisen ajan alun jälkeen ja sen lähteiden tuntemisessa on puutteita. Ilmakehän metaanista suurimman osan on arveltu olevan peräisin anaerobisissa olosuhteissa tapahtuvasta metanogeneesistä. Boreaaliset metsät on mielletty CH₄-nieluiksi maan hapellisessa kerroksessa tapahtuvan metaaninsitoutumisen vuoksi. Myös puut toimivat CH₄-lähteinä joko helpottamalla maassa anaerobisesti syntyneen metaanin pääsyä ilmakehään tai tuottamalla sitä itse. Vaikka ensimmäiset havainnot puiden CH₄-päästöistä tehtiin jo lähes 20 vuotta sitten, on vasta viimeaikainen tutkimus osoittanut että puiden CH₄-päästöt voivat vaikuttaa huomattavasti metsien CH₄-taseeseen. Suurimpien arvioiden mukaan puiden vapauttaman metaanin osuus on jopa 10–40 % globaalista CH₄-budjetista. Puiden CH₄-päästöjen tutkimus on tähän asti suuntautunut enimmäkseen trooppiselle ja temperaattiselle kasvillisuusvyöhykkeelle, mutta tutkimus boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä on jäänyt vähäiseksi.</p> <p>Tämän pro gradu -työn tavoitteena on arvioida boreaalisella havumetsävyöhykkeellä tavanomaisesti esiintyvien kahden puulajin, hieskoivun (<i>Betula pubescens</i>) ja kuusen (<i>Picea abies</i>), CH₄-vuota ja sen vaihtelua kasvukauden alussa. Työn aineistona on käytetty 28.4.–11.6.2015 Hyytiälässä kahdella eri koealalla havaittuja puiden ja metsänpohjan CH₄-voita, jotka on mitattu hieskoivujen ja kuusien rungoista ja oksista käyttäen suljettua kammiomittausmenetelmää. Koealoina olivat soistunut alue (metsäkortekorpi), jolta valittiin 4 koepuuta (2 hieskoivua, 2 kuusta) ja kivennäismaa-alue (kuivahko kangas), jolta valittiin yksi koepuu (hieskoivu).</p> <p>Tutkimuksissa havaittiin, että sekä hieskoivut että kuuset toimivat CH₄-lähteinä rungoista ja oksista, vaikka ne myös ajoittain sitoivat metaania. Havaitut CH₄-vuot olivat suuruusluokaltaan hyvin vaihtelevia. Suurimmat CH₄-päästöt havaittiin soistuneella kasvupaikalla kasvavien hieskoivujen rungoista, joissa runkopinta-ala kohtaiset päästöt vähenivät eksponentiaalisesti puun pituusprofiilissa tyvestä latvaa, ja rungon tyveltä mitatut suurimmat päästöt myös kasvoivat kevään edetessä. Soistuneella koealalla puiden runkojen CH₄-vuo korreloi maalämpötilojen kanssa sekä positiivisesti (hieskoivu) että negatiivisesti (kuuset). Sadekertymän havaittiin korreloivan negatiivisesti koivujen runkojen vuon kanssa. Muilla taustamuuttujilla (esim. ilman lämpötila, säteily, mahlan virtausnopeus) ei ollut havaittavaa yhteyttä puiden CH₄-vuohon. Korrelaatioita ei myöskään havaittu kivennäismaakohteella olleen hieskoivun keskiarvoisten CH₄-voiden ja taustamuuttujien välillä. Puiden CH₄-vuosta tehtiin yleistys metsikkötasolle, mikä osoitti kuusien päästöjen (6,15 g ha⁻¹ vrk⁻¹) olevan suurempia kuin hieskoivujen päästöt (5,82 g ha⁻¹ vrk⁻¹) johtuen kuusien oksiin sitoutuneesta suuremmasta biomassan määrästä verrattuna hieskoivuihin. Tästä syystä kuuset voivat olla merkittävämpiä metaanin vapauttajia kuin hieskoivut.</p> <p>Työn tulokset vahvistavat aiempien tutkimusten havainnot puiden CH₄-päästöistä ja osoittavat että myös boreaalisen kasvillisuusvyöhykkeen puilla voi olla merkittävä rooli globaalissa CH₄-budjetissa, jossa puiden CH₄-vuota ei ole tähän asti lainkaan huomioitu. Hieskoivujen ja kuusien erilainen vaste kasvukauden alkuun, maalämpötilaan ja sateisuuteen viittaa puulajien välisiin eroihin CH₄-vuota säätelevissä tekijöissä tai metaanin kuljetukseen liittyvässä fysiologiassa.</p>			
<p>Avainsanat – Nyckelord – Keywords</p> <p><i>Betula pubescens</i>, CH₄, ilmasto, metaani, <i>Picea abies</i>, puiden CH₄-päästöt, suo, vuo</p>			
<p>Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited</p> <p>Metsätieteiden laitos ja Viikin tiedekirjasto</p>			
<p>Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information</p> <p>Työ on toteutettu osana METATREE –tutkimushanketta, jota johtaa Mari Pihlatie (Ilmakehätieteiden osasto, Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto) ja rahoittaa Suomen Akatemia.</p>			

Sisältö

Käsitteistö.....	4
1. Johdanto	5
1.1 Puiden metaanin vaihdon prosessit	7
1.1.1 Metaanin vaihto puiden ja ilmakehän välillä.....	8
1.1.2 Metaanin tuotto ja kulutus puussa.....	8
1.1.3 Metaanin kuljetus maasta	10
1.2 Puun metaanivuohon vaikuttavat tekijät.....	11
1.3 Boreaaliset metsät metaanin lähteenä ja nieluna.....	12
1.4 Työn tavoitteet.....	12
2. Aineistot ja menetelmät.....	13
2.1 Mittauspaikka ja aineiston hankinta	13
2.2 Koealat	14
2.2.1 Koepuut	15
2.3 Metaanivoiden mittaaminen kammiomittausmenetelmällä	16
2.3.1 Maakammiot	17
2.3.2 Runkokammiot.....	18
2.3.3 Oksakammiot	19
2.4 Taustamuuttujat	20
2.5 Aineiston käsittely, laskenta ja analyysi	21
2.5.1 Kaasuanalyysit	21
2.5.2 Metaanivoiden laskeminen	21
2.5.3 Metaanivoiden laskenta puu- ja metsikkötasolle	23
2.5.4 Tilastolliset menetelmät	25
3. Tulokset.....	26
3.1 Taustamuuttujat	26
3.1.1 Ilman lämpötila ja sademäärä	26
3.1.2 Maan lämpötila ja kosteus	27
3.1.3 Säteily	28
3.1.4 Lehtipinta-alan kehitys ja metsikkötason hiilensidonta	29
3.1.5 Mahlan virtaus	30
3.2 Puiden runkojen metaanivuo.....	31
3.2.1 Puiden runkojen metaanivoiden ajallinen vaihtelu	31
3.2.2 Puiden runkojen metaanivuo runkojen eri korkeuksilta.....	34
3.2.3 Puiden runkojen metaanivoiden vaihtelu puulajien ja kasvupaikkojen välillä.....	36

3.3 Puiden oksien metaanivuo	37
3.3.1 Puiden oksien metaanivoiden ajallinen ja kerrosten välinen vaihtelu	37
3.3.2 Puiden oksien metaanivoiden vaihtelu puulajien ja kasvupaikkojen välillä	38
3.4 Metsänpohjan metaanivuo	39
3.4.1 Metsänpohjan metaanivuon ajallinen ja kasvupaikkojen välinen vaihtelu	40
3.5 Puiden metaanivuot metsikkötasolla	41
3.6 Ympäristötekijät	42
3.6.1 Maan lämpötilojen ja metaanivuon välinen korrelaatio	42
3.6.2 Sadannan ja metaanivuon välinen korrelaatio	44
3.6.3 Muiden taustamuuttujien ja metaanivuon välinen korrelaatio.....	44
4. Tulosten tarkastelu	45
4.1 Puiden runkojen metaanivuo ja vuota säätelevät tekijät.....	45
4.2 Latvuston metaanivuot ja niitä säätelevät tekijät	48
4.3 Metsänpohjan metaanivuot ja niitä säätelevät tekijät	49
4.4 Puiden merkitys metsikkötason metaanitaseseen	49
4.5 Virhelähteet	51
4.5.1 Kammiomittausten virhelähteet	51
4.5.2 Vuon laskennan ja yleistämisen virhelähteet.....	52
4.5.3 Muita virhelähteitä	53
5. Johtopäätökset.....	53
Kiitokset	55
Lähteet.....	56
Liitteet	62

Käsitteistö

Aerobinen

Allogeeninen

Anaerobinen

Autogeeninen

CH₄

CO₂

Lämmityspotentiaali

Metanogeeni

Metanogeneesi

Metanotrofi

N₂O

PAR

ROS

Transpiraatio

Vuo

Hapellinen

Systeemin ulkoinen tekijä

Hapeton

Systeemin sisäinen tekijä

Metaani

Hiilidioksidi

Kasvihuonekaasun lämmittävä vaikutus tietyllä aikavälillä (esim. 100 vuotta) suhteutettuna masaltaan samaan määrään hiilidioksidia (engl. *Global Warming Potential, GWP*)

Metaania tuottava mikrobi

Hapettomissa olosuhteissa tapahtuva mikrobiperäinen metaanintuotanto

Metaania hapettava mikrobi

Typpioksiduuli

Fotosynteesistä aktiivinen säteily (400–700nm) (engl. *photosynthetically active radiation, PAR*)

Reaktiivinen happiradikaali (engl. *reactive oxygen specie, ROS*), eli kemiallisesti reaktiivinen happea sisältävä molekyyli

Kasvien ja/tai maan yhteisvaikutuksesta syntynyt haihdunta

Tietyn aineen virtausnopeus tiettyä pinta-alaa kohden. Vuo voi saada sekä positiivisia että negatiivisia arvoja

1. Johdanto

Ihmisperäinen kasvihuonekaasujen lisääntyminen ilmakehässä ja siitä johtuva ilmaston lämpeneminen on yksi tärkeimmistä syistä kasvihuonekaasujen ja niiden päästöjen tutkimukselle. Tutkimus kohdistuu useimmiten kolmeen keskeisimmistä kasvihuonekaasuista: hiilidioksidiin (CO_2), metaaniin (CH_4) ja typpioksiduuliin (N_2O). Näistä yleisesti tunnetuin on CO_2 , jota käytetään usein vertailukohtana arvioitaessa muiden kasvihuonekaasujen vaikutuksia. Eri kasvihuonekaasujen ilmakehään kohdistamaa lämmittävää vaikutusta vertaillaan tavallisesti niiden aiheuttaman lämmityspotentialin perusteella (engl. *Global Warming Potential*, GWP), jolla tarkoitetaan suhdetta hiilidioksidin lämmittävään vaikutukseen tietyssä aikaikkunassa (Myhre ym. 2013). Metaani on ilmastoa lämmittävältä vaikutukseltaan noin 28 kertaa voimakkaampi kuin CO_2 (100 vuoden lämmityspotentialina, GWP_{100}), vaikka metaanin elinikä ilmakehässä (engl. *Atmospheric Life Time*) onkin vain 9 vuotta (Myhre ym. 2013).

Metaanin, kuten muidenkin edellä mainittujen kasvihuonekaasujen pitoisuus ilmakehässä on ollut voimakkaassa kasvussa teollistumisen alun jälkeen (Hartmann ym. 2013). Arktisten alueiden jääkerrostumista on pystytty analysoimaan aikaisempia ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksia satojen vuosien ajalta (Etheridge ym. 1996, 1998). Näytteiden perusteella on havaittu, että vuodesta 1750 vuoteen 2011 mennessä ilmakehän CH_4 -pitoisuus on kasvanut 150 % (biljoonasosina (ppb) 722:sta 1803 ppb:hen) (Etheridge ym. 1998, Prather ym. 2012, Hartmann ym. 2013). Ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksien kasvua on aiheuttanut pääasiassa fossiilisten polttoaineiden käyttö, maankäyttömuutokset, maatalouden ja siihen liittyvän lannoitteiden käytön lisääntyminen sekä erilaiset teollisuuden prosessit (Hartmann ym. 2013, Ciais ym. 2013).

Yleinen käsitys on, että suurin osa ilmakehän metaanista on tuotettu mikrobiologisesti hapettomissa olosuhteissa (Conrad 2009). Metaania tuottavien arkeonien eli metanogeenien toiminta on tyypillistä anaerobisissa olosuhteissa kuten soilla, riisiviljelmillä ja karjanhoidossa (Conrad 2009). Soista myös vapautuu metaania ilmakehään diffuusiolla, kuplimalla ja aluskasvillisuuden tuuletussolukkojen (aerenkyymi) kautta

(Gaynard ja Armstrong 1987, Laanbroek 2010). Tuuletussolukko ulottuu kasvin juurien avulla vedenpinnan (engl. *water table*, WT) alapuolelle hapettomiin olosuhteisiin ja hoitaa näin juuriston kaasunvaihdon kuljettaen samalla metaania ilmakehään.

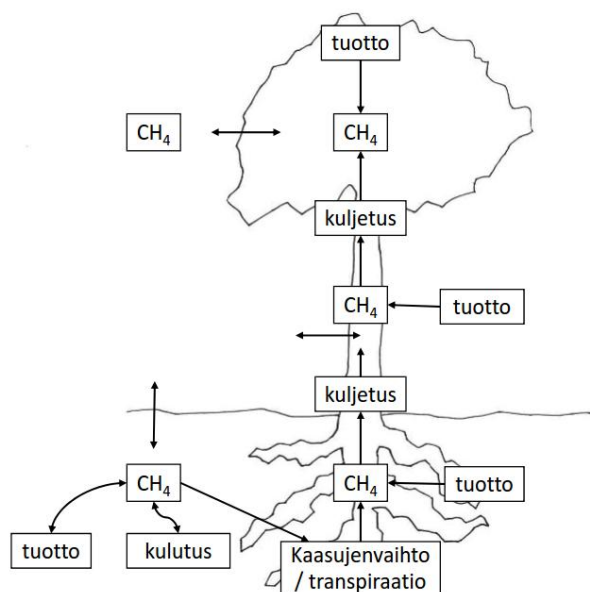
Myös puut voivat vapauttaa metaania ilmakehään (Rusch ja Rennenberg 1998, Rice ym. 2010, Pangala ym. 2013), minkä osuutta metsien vuotuisen globaaliin CH₄-budjettiin on ryhdytty arvioimaan vasta kuluneen vuosikymmenen aikana. Havainto odottamattoman suurista CH₄-pitoisuuksista trooppisten suosademetsien yläpuolella (Frankenberg ym. 2005) johti kysymykseen puiden mahdollisesta osuudesta CH₄-päästöihin: Kepplerin ym. (2006) tutkimukset osoittivat, että puut voivat toimia aerobisissa olosuhteissa tuotetun metaanin lähteenä vapauttaen globaalisti 62–236 Tg metaania vuosittain. Tämä vastaisi 10–40 % tunnetusta globaalista vuosittaisesta CH₄-budjetista (Bloom ym. 2010). Havaitut CH₄-päästöt vaikuttivat alkuun huomattavan suurilta, ja kritiikkiä kohdentui erityisesti havaintojen ekstrapolointiin (Kirschbaum ym. 2006), joka oli tehty eri kasvillisuusvyöhykkeiden lehtipinta-alaan perustuen (Keppler ym. 2006). Havainnot aerobisissa olosuhteissa tuotetusta metaanista olivat myös ristiriidassa aikaisempien olettamuksien kanssa, joiden mukaan metaania voisi syntyä ainoastaan hapettomissa olosuhteissa (Keppler ym. 2006). Näistä syistä oli ilmeistä, että CH₄-lähteiden ja kulkeutumismekanismien selvittämiseksi sekä tapahtuvan vuon tarkentamiseksi tarvittiin lisätutkimuksia.

Tätä seuranneen vuosikymmenen aikana on tehty runsaasti tutkimusta puiden CH₄-päästöistä, ja tulokset ovat olleet vuon suuruuslaskelmien osalta vaihtelevia, toisinaan jopa ristiriitaisia (Keppler ym. 2006, Dueck ym. 2007, Beerling ym. 2008, McLeod ym. 2008). Vahvistumassa on kuitenkin käsitys, jonka mukaan muun muassa joidenkin suokasvien, kuten sarojen (*Carex sp.*) (Ding ym. 2005) ja tupasvillan (*Eriophorum vaginatum*) (Greenup ym. 2000) ohella, myös puut voivat kuljettaa metaania maan hapettomista olosuhteista ilmakehään (Rusch ja Rennenberg 1998, Rice ym. 2010, Pangala ym. 2013) ja toimia myös itse CH₄-lähteinä (Keppler ym. 2006, McLeod ym. 2008). Kepplerin ym. (2006) arvio puiden aiheuttamista globaaleista CH₄-päästöistä ovat suuruusluokaltaan toistaiseksi korkein esitetty (Bloom ym. 2010), muiden arvioiden ollessa yleisesti huomattavasti pienempiä. Esimerkiksi Magonigal ja Guenther (2008) arvioivat elävän kasvillisuuden CH₄-päästöjen olevan 34–56 Tg vuosittain, mikä on lähes yhden suuruusluokan vähemmän kuin Kepplerin ym. (2006) arvioimat päästöt.

Boreaalisen kasvillisuusvyöhykkeen metsät ovat tärkeitä hiilinieluja (Hari ja Kulmala 2005). Boreaalinen havumetsävyöhyke kattaa noin 15 % planeettamme maapinta-alasta ja on näin ollen merkittävässä asemassa kasvillisuusvyöhykkeiden välisessä vertailussa. Hiilidioksidia sitoutuu puustoon, aluskasvillisuuteen ja soihin, ja kivennäismaat toimivat tavallisesti CH_4 -nieluna niissä elävien metanotrofien takia. Luonnontilaiset suot sen sijaan tunnetaan metaanilähteinä. Puiden rooli CH_4 -lähteenä tai nieluna on huonosti tunnettu, mutta mikäli puut osallistuvat metsien CH_4 -vaihtoon, tulisi metsien merkitys metaanin lähteenä tai nieluna arvioida uudelleen.

1.1 Puiden metaanin vaihdon prosessit

Vaikka puiden on osoitettu päästävän metaania, on päästöjen alkuperä osittain tuntematon. Mikrobiperäinen CH_4 syntyy anaerobisissa olosuhteissa tapahtuvan hajotustoiminnan tuloksena (Conrad 2009). Joissain tapauksissa puut voivat itsessään tarjota tämän kaltaisia elinympäristöjä (Zeikus ja Ward 1974), jolloin CH_4 -tuotantoa tapahtuu puun sisäisesti. Puiden päästämän metaanin alkuperää on pystytty parhaiten selittämään joko maaperän hapettomissa (Rusch ja Rennenberg 1998, Pangala ym. 2013) tai lehdistä aerobisissa olosuhteissa (Keppler ym. 2006, McLeod ym. 2008) tapahtuvalla CH_4 -tuotannolla. Puiden erilaiset metaaninvaihdon prosessit ovat hahmoteltuna kuvassa 1.



Kuva 1. Metaanin kulkeutuminen puun kautta ilmakehään.

1.1.1 Metaanin vaihto puiden ja ilmakehän välillä

Puiden ja ilmakehän välisen metaaninvaihdon toimintamallia ei tunneta kovin hyvin, mutta kaasunvaihdon on esitetty tapahtuvan kahdella eri vaihtoehtoisella tai samanaikaisella tavalla: rungosta korkkihuokosten (Pangala ym. 2014) tai lehtien ilmarakojen (Machacova ym. 2016) kautta. Näiden kautta puusta tuleva CH_4 vaihtuu happeen (O_2), joka taas kulkeutuu puun lävitse molekulaarisen diffuusion tai konvektion avulla kasvin läpi aina juuristoon saakka (Taiz ja Zeiger 2010). Pangala ym. (2014) havaitsivat korkkisolujen lukumäärän ja runkojen CH_4 -vuon välillä positiivisen korrelaation, mikä vastaa hyvin edellä esitettyä olettamusta korkkisolujen kautta tapahtuvasta runkojen metaanin vapauttamisesta. Sen sijaan viitteet lehtien ja neulasten ilmarakojen kautta tapahtuvasta metaaninvaihdosta ovat osittain ristiriitaisia:

Machacova ym. (2016) havaitsivat mäntyjen oksien CH_4 -päästöjen korreloivan positiivisesti rungon mahlanvirtausnopeuden kanssa, jota pidettiin merkinä transpiraation avulla tapahtuvasta metaaninkuljetuksesta rungossa. Toisaalta niin ikään puuvar-tisella kasvulla, riisillä tehdyissä kokeissa Nouchi ym. (1990) käyttivät valon määrää transpiraatiota säätelevänä tekijänä, eivätkä havainneet muutoksia metaanivuossa lehtiin kohdistuvaa valon määrää vaihtelemalla. Näin ollen Nouchin ym. (1990) mukaan vaikuttaisi siltä, ettei transpiraatio olekaan CH_4 -vuota säätelevä tekijä, ja että metaania vapautuisi lehtien ilmarakojen sijaan niiden mikrohuokosista. Männyn ja riisin CH_4 -kuljetusmekanismit voivat ymmärrettävästi olla hyvin erilaiset, mutta la-jien välisiä eroja CH_4 -vuossa on havaittu myös samalla koealalla kasvavien puiden välillä (Pangala ym. 2015).

1.1.2 Metaanin tuotto ja kulutus puussa

Metaanin tuottoa ja kulutusta voi tapahtua puun eri osissa, mutta niihin liittyvät pro- sessit ovat vielä heikosti tunnettuja (Sundqvist ym. 2012). Metaanin tuotto jaotellaan tavallisimmin metaanin syntyperän perusteella hapellisiin ja hapettomiin olosuhte-isiin (Wang ym. 2011). Koska metaania voi kuitenkin syntyä hapettomissa ja hapelli- sissa oloissa sekä bioottisesti että abioottisesti (Wang ym. 2011, Lenhart ym. 2012), voidaan myös niiden taustalla olevat prosessit jakaa bioottisiin ja abioottisiin tekijöi- hin.

Bioottiset tekijät

Metaanin tuottoon ja kulutukseen liittyvillä bioottisilla tekijöillä tarkoitetaan metaania tuottavia ja hapettavia mikrobeja, jotka voivat olla bakteereita tai sieniä. Mahdollisesta puunrungossa tapahtuvasta mikrobiperäisestä CH₄-tuotosta on saatavilla melko vähän tutkimustietoa, eikä terveistä rungoista ole juurikaan löydetty metanogeenejä tai metanotrofeja. Zeikus ja Ward (1974) osoittivat kuitenkin hajoavan sydänpuun voivan sisältää runsaasti metanogeeneja. Runkoa kairaamalla huomattiin, että metaania oli rungoissa niin paljon, että sitä voitiin polttaa näkyvällä liekillä rungon reiästä (Zeikus ja Ward 1974). Mukhin ja Voronin (2011) havaitsivat laboratorio-olosuhteissa terveestä puuaineksesta syntyvän metaania, ja että metaanin tuotto korreloi positiivisesti hapen kulutuksen kanssa. He nostivat esiin mahdollisuuden, että eläväkin puuaines voisi sisältää metanogeeneja (Mukhin ja Voronin 2011). Tätä ei kuitenkaan ole toistaiseksi voitu osoittaa todeksi. Myös saprotrofisten sienien on havaittu aiheuttavan CH₄-päästöjä niin itsenäisenä tekijänä hapellisissa olosuhteissa kuin puun sisäisenä sydänlahona (Covey ym. 2012, Lenhart ym. 2012). Vaikka terveiden puiden rungoista on monissa tutkimuksissa havaittu CH₄-päästöjä, on emittoituvan metaanin alkuperän yleensä arveltu olevan maaperässä (Rusch ja Rennenberg 1998, Terazawa ym. 2007, Gauci ym. 2010, Pangala ym. 2013).

Abioottiset tekijät

Metaanivuohon voi vaikuttaa myös joukko abioottisia tekijöitä, jotka voivat olla luonteeltaan kasviin ulkopuolelta kohdistuvia ja sen fysiologisiin toimintoihin vaikuttavia tekijöitä. Näiden tekijöiden tarkat vaikutusmekanismit ja CH₄-vuohon liittyvät prosessit ovat vielä osittain tuntemattomia. Koska tavallisimpana bioottisena CH₄-päästöjä aiheuttavana tekijänä pidetään kuitenkin anaerobisissa olosuhteissa eläviä metanogeenejä, voidaan hapellisissa olosuhteissa tapahtuvaa metaanin vapautumista pitää merkinä vuohon vaikuttavien abioottisten tekijöiden läsnäolosta. Esimerkiksi kasvien lehdistä on kuitenkin havaittu CH₄-päästöjä hapellisissa olosuhteissa (Keppler ym. 2006, McLeod ym. 2008, Bloom ym. 2010, Wang ym. 2011) ja muun muassa lämpötilan, kasvin osien vaurioitumisen, ultraviolettisäteilyn (*engl.*

ultra violet radiation, UV radiation) sekä reaktiivisten happiradikaalien (engl. *reactive oxygen species*, ROS) läsnäolon on huomattu vaikuttavan positiivisesti päästöihin. Toisaalta PAR-säteilyn (engl. *photosynthetically active radiation*, PAR) on huomattu yksittäisessä tutkimuksessa korreloivan negatiivisesti CH₄-vuon kanssa (Sundqvist ym. 2012).

CH₄-päästöjen on huomattu olevan yhteydessä lehdissä tapahtuvaan pektiinin hajoamiseen: Messenger ym. (2009) havaitsivat, että pektiinin hajoamista edistävät reaktiiviset happiradikaalit, joita muodostuu kasvisolukossa niin tavanomaisen solun metabolian kuin erilaisten stressireaktioidenkin seurauksena (Apel ja Hirt 2004, Nisbet ym. 2009). Reaktiivisilla happiradikaaleilla on olennainen rooli kasvin ”viestinviejämolekyylinä” liittyen kehitykseen ja puolustautumiseen patogeeneiltä (Apel ja Hirt 2004). Muodostuessaan kasvisolukossa happiradikaalit alkavat hajottamaan soluseinien rakennusmateriaalina toimivaa pektiiniä, erityisesti siinä olevia esterimeytyli -ryhmiä (Keppler ym. 2008).

Kasvit voivat olla tärkeässä roolissa sekä hapellisissa että hapettomissa olosuhteissa syntyneen metaanin välittämisessä ilmakehään. Joidenkin näkemysten mukaan olisi-kin eroteltava pikemminkin mikrobiperäinen ja ei-mikrobiperäinen CH₄-tuotto, sen sijaan että pitäisimme erottavana tekijänä aerobisia tai anaerobisia olosuhteita (Wang ym. 2011).

1.1.3 Metaanin kuljetus maasta

Vaikka lukuisat tutkimukset ovat todenneet puiden kuljettavan metaania maaperästä ilmakehään (Rusch ja Rennenberg 1998, Terazawa ym. 2007, Gauci ym. 2010, Pangala ym. 2013), on itse kuljetusmekanismien tutkimus jäänyt vähäiseksi ja siten huonosti tunnetuksi (Pangala ym. 2015). Lisäksi tutkimuksia on tehty lähinnä kosteissa olosuhteissa kasvavilla puilla.

Kasvien on osoitettu muodostavan aerenkymisolukkoa vastareaktionä abiootteselle stressille (De Simone ym. 2002, Evans 2003), jollaiseksi voidaan katsoa myös veden pinnan nousu ja vaihtelu maaperässä. Aerenkymisolukko kuljettaa happea asvin juurikerrokseen, jossa se vaihtuu muihin maaperässä tuotettuihin kaasuihin, kuten

metaaniin, hiilidioksidiin sekä etyleeniin (Evans 2003). Aerenkymisolukon muodostuminen tunnetaan yleisesti hyvin ruohovartisten kasvilajien kohdalla, mutta sen muodostumisesta puissa ei ole toistaiseksi laajempaa lajikohtaista tietoa. Joidenkin temperaattisten ja trooppisten puulajien kohdalla on kuitenkin osoitettu, että tuuletus- solukon ja adaptiivisten rakenteiden kehittymistä voi tapahtua myös puilla (Yamamoto ym. 1995, De Simone ym. 2002). Boreaalisten puulajien kohdalla tällaista ei ole vielä osoitettu. Tällaisten solurakenteiden on arveltu useissa puiden CH₄-vuohon liittyvissä tutkimuksissa olevan pääasiallinen keino puissa tapahtuvalle metaaninkuljetukselle (Machacova ym. 2013, Pangala ym. 2014, Pangala ym. 2015, Terazawa ym. 2015).

Vaihtoehtoinen tapa metaaninkuljetukselle voi olla puiden transpiraatiovirran mukana kulkeutuminen. Tällöin metaania kulkeutuisi puussa haihduntaveteen liuenneena. Tällaista hypoteesia tukevana havaintoina on pidetty puista vapautuvan metaanin ja mahlan virtausnopeuden välistä korrelaatiota (Machacova ym. 2016) sekä CH₄-päästöjen pienenemistä lehtien putoamisen jälkeen (Pangala ym. 2015). Mahlan virtausnopeutta on käytetty kuvaamaan puussa tapahtuvan transpiraation voimakkuutta (Hölttä ym. 2010).

1.2 Puun metaanivuohon vaikuttavat tekijät

Vähäisestä tutkimuksesta huolimatta, puiden CH₄-vuhon vaikuttavia tekijöitä on pysytty löytämään. Puiden metaanivuohon vaikuttavien tekijöiden voidaan lähtökohtaisesti ajatella olevan suoraan yhteydessä puiden päästämän metaanin syntyperään, eli maaperään tai puun, oksien ja lehtien sisäisesti tapahtuvaan metaanintuottoon. Toisaalta puussa tapahtuvaan metaaninkuljetukseenkin voi vaikuttaa monet tekijät.

Puiden runkojen kautta tapahtuvan CH₄-vuon on havaittu olevan yhteydessä maan huokosveden CH₄-konsentraatioon (Pangala ym. 2014), maan lämpötilaan (Terazawa ym. 2015), puuaineen tiheyteen (Pangala ym. 2013), maaveden korkeuteen (Terazawa ym. 2015), rungossa olevien korkkihuokosten lukumäärään (Pangala ym. 2014) sekä mahlan virtausnopeuteen (Machacova ym. 2016). Lisäksi runkojen CH₄-vuon on havaittu vaihtelevan vuodenajan mukaan (Terazawa ym. 2015, Pangala ym. 2015) ja päästöjen vähenevän puiden korkeusprofiilissa (Pangala ym. 2014).

Puiden lehtien ja neulasten kautta emittoituvan metaanin alkuperä voi olla sama kuin rungoiltakin vapautuneella, mutta metaanintuottoa voi tapahtua myös lehdissä. Suoraan lehdissä tai neulasissa syntyneen metaanin vapautumista säätelevistä tekijöistä ei toistaiseksi tiedetä paljoa, mutta säätelijänä voi toimia osittain niissä olevien ilmarakojen (tai mikrohuokosten, kuten Nouchi ym. (1990) ehdottavat) toiminta. Korkea lämpötilan ja UV-säteilyn on arveltu aiheuttavan metaanin vapautumista lehdistä niissä hajoavan pektiinin takia (Keppler ym. 2006, Keppler ym. 2008). Lehdissä syntyvä metaani ja siihen vaikuttavat tekijät on käsitelty luvussa 1.1.

1.3 Boreaaliset metsät metaanin lähteenä ja nieluna

Puiden metaanivuota on aikaisemmin tutkittu enimmäkseen trooppisissa suometsissä, kun taas boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä vastaavanlainen tutkimus on toistaiseksi ollut melko vähäistä. Metsissä tapahtuu metaaninvaihtoa myös maan ja ilmakehän välillä. Boreaalisen havumetsävyöhykkeen luonnontilaiset suot toimivat pääasiassa metaanin lähteinä. Metsien on arveltu kokonaisuudessaan kuitenkin enemmän sitovan metaania kuin vapauttavan sitä. Syynä tälle maan hapellisessa kerroksessa tapahtuva metanotrofien aiheuttama metaanin sitoutuminen, joka joidenkin arvioiden mukaan kattaa 10 % kaikista tunnetuista CH₄-nieluista (Topp ja Pattey 1997) ja on samalla suurin yksittäinen nielu ilmakehässä olevalle metaanille (Le Mer ja Roger 2001).

1.4 Työn tavoitteet

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on arvioida kahden boreaalisella havumetsävyöhykkeellä tavanomaisesti esiintyvän puulajin, hieskoivun (*Betula pubescens*) ja kuusen (*Picea abies*), CH₄-vuota puiden rungoissa ja oksissa kasvukauden alussa ja selvittää vuon merkitys metsän metaanitaseeseen. Puiden CH₄-vuota verrataan maapohjan CH₄-voihin. Tavoitteena on myös selvittää CH₄-vuon mahdollinen vaihtelu eri puulajien ja kasvupaikkojen välillä ja metaanivuohon vaikuttavat ympäristötekijät. Hypoteesini ovat

1. Koivu ja kuusi ovat metaanin lähteitä
2. Rungon CH₄-päästöt ovat suuremmat puun tyvellä kuin korkeammalla rungossa
3. Runkojen CH₄-päästöt kasvavat kasvukauden edetessä
4. Oksien CH₄-vuo korreloi PAR-säteilyn kanssa
5. Puiden CH₄-vuon ja maan lämpötilan välillä on positiivinen korrelaatio

Puuston aiheuttamat CH₄-päästöt voivat kokonaisuudessaan olla merkittäviä, mikä johtaa myös vuositason metaanibudjetin uudelleenarviointiin. Työn tulokset voivat nostaa esiin tarpeen tehdä tarkennuksia myös kotimaisten talousmetsiemme kasvi-huonekaasutaseeseen.

2. Aineistot ja menetelmät

2.1 Mittauspaikka ja aineiston hankinta

Työn aineisto kerättiin Hyytiälässä sijaitsevan SMEAR II tutkimusaseman (Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations) läheisyydestä. Vuonna 1995 Helsingin yliopiston metsäaseman alueelle perustetun SMEAR II aseman (61°51'N, 24°17'E, 181 m merenpinnan yläpuolella) tarkoituksena on seurata ja havainnoida ilmaston ja boreaalisen metsän välistä pienhiukkasten ja kaasujen vaihtoa, sekä tutkia näiden yhteyttä ympäristöön ja sen prosesseihin (Hari ja Kulmala 2005). Sen lisäksi asemalla mitataan erilaisia puiden fysiologisia ominaisuuksia sekä monia meteorologisia suureita, kuten säteilyn, sadannan ja tuulisuuden määrää. Kasvihuonekaasuvirtoja mitataan metsäekosysteemin monella eri tasolla, mikä lisää ymmärrystä prosessien yhteyksistä toisiinsa ja vuorovaikutuksesta ilmakehän kanssa. SMEAR II on osa eurooppalaista ICOS -tutkimusinfrastruktuuria (Integrated Carbon Observation System), jonka keskeisenä tavoitteena on tuottaa pitkäaikaista ja yhdenmukaista tuotettua tietoa ilmakehän ja ekosysteemien ominaisuuksista sekä niiden välisistä vuorovaikutuksista, mutta myös seurata kasvihuonekaasunielujen ja -lähteiden ajallista ja alueellista vaihtelua.

Alueella vallitsevana metsätyyppinä on mäntyvaltainen (*Pinus sylvestris*) kuivahko kangas, jossa sekapuuna myös ylemmässä latvuserroksessa esiintyy yksittäisiä koivuja (*Betula sp.*), kuusia (*Picea abies*) ja haapoja (*Populus tremula*) (Hari ja Kulmala 2005). Ympäristössä on myös paljon korkeusvaihtelua ja painanteita, joissa maaperän kosteus on suurempi ja pieniä soistumia voi esiintyä.

Maastotyöt toteutettiin aikavälillä 13.4.–13.6.2015, minkä aikana CH₄-vuomittauksia yhteensä 22:sa näytteenotossa. Näytteenotoista 16 suoritettiin metsäkortekorven ja 6 kuivahkon kankaan koealalla. Metsäkortekorven näytteenotoista 5 suoritettiin yöllä vuon vuorokausittaisen vaihtelun selvittämiseksi.

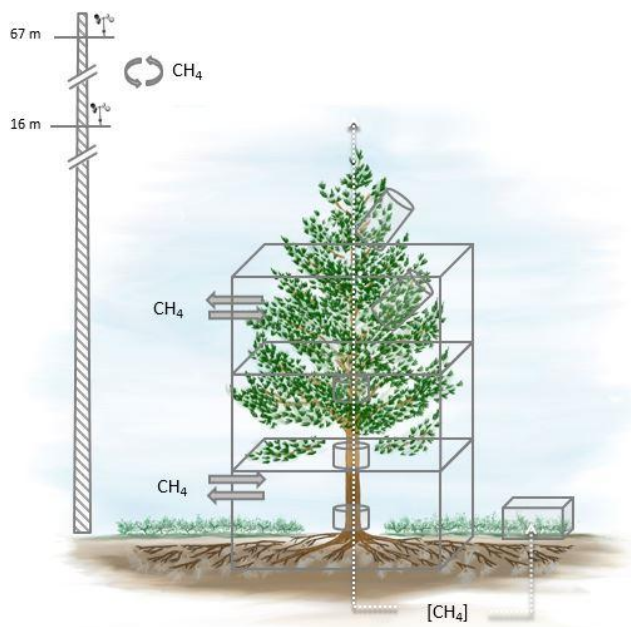
2.2 Koealat

Aineistoa kerättiin kahdelta eri koealalta, joilla on erilaiset kasvuolosuhteet, kasvu- paikkatyypit ja puustorakenteet. Aiempien tutkimusten perusteella tähän kokeeseen valittiin kostea ja kuiva kasvupaikka, joiden on havaittu eroavan merkitsevästi mäntytien CH₄-päästöjen osalta (Machacova ym. 2016). Pääosa mittauksista tehtiin pienialaisesti soistuneella alueella, joka oli suotyypiltään välipintaista metsäkortekorpea (MkK) (Laine ja Vasander 2008) ja sijaitsi rinteen pohjalla olevassa painanteessa. Soistunut alue oli pinta-alaltaan noin 300 m², ja sitä ympäröi noin 50-vuotias tuorekankaan männikkö. Koepuiden läheisyydessä vedenpinnantaso oli noin 10 cm syvyydessä tai korkeammalla ja turpeen paksuus on keskimäärin 60 cm. Vallitseva puulaji on kuusi ja sekapuuna esiintyy hieskoivua, kun taas pensaskerroksessa esiintyy runsaasti pihlajaa (*Sorbus aucuparia*) ja hieman pajua (*Salix sp.*). Kenttäkerroksessa tyypillisesti esiintyviä kasveja ovat mm. metsäkorte (*Equisetum sylvaticum*) ja maari- ankämmeikka (*Dactylorhiza maculata*). Pohjakerroksessa valtalajina on korpirahkasammal (*Sphagnum girgensohnii*), joka on vallitseva niin mätäspinoilla kuin painanteissakin. Muita yleisiä pohjakerroksen sammallajeja ovat mm. korpikarhunsammal (*Polytrichum commune*) ja erityisesti mättäillä metsäkerrossammal (*Hylocomium splendens*) sekä seinäsammal (*Pleurozium schreberi*).

Toinen mittauspaikka oli kivennäismaalla SMEAR II aseman valuma-alueella ja oli kasvupaikkatyypiltään kuivahkoa kangasta (VT). Alueen puusto on noin 50-vuotias männikkö, jossa sekapuuna esiintyy myös kookkaita koivuja, ja pensaskerroksessa

on harvakseltaan pihlajaa sekä kuusen ja männyn taimia. Kenttäkerroksen varvuista valtalajina on mustikka (*Vaccinium myrtillus*) ja puolukka (*V. vitis-idaea*), kanervaa (*Calluna vulgaris*) esiintyy satunnaisesti. Yleisimpiä sammalia ovat seinäsammal sekä metsäkerrossammal ja jäkälää (*Cladonia sp.*) esiintyy harvakseltaan pieninä laikkuina.

Molemmille koealoille oli pystytetty rakennustelineet, joiden avulla mittauksia voitiin tehdä puiden latvustosta ja runkojen eri korkeuksilta (Kuva 2).



Kuva 2. Runko-, oksa- ja maakammioiden sijoittelu mittauspaikalla. Mittauksissa käytettiin apuna rakennustelineitä, jotka sijoitettiin puiden viereen. Näin mittauksia voitiin tehdä eri puiden korkeuksilta (Kuva: Kieloaho & Pihlatie).

2.2.1 Koepuut

Soistuneen alueen koealalta koepuiksi valittiin kaksi hieskoivua ja kaksi kuusta. Koepuut valittiin siten, että niiden terveydentila, koko ja kasvuolosuhteet vastasivat hyvin kasvupaikalle tyypillisiä olosuhteita. Koepuut olivat lähellä toisiaan, mikä mahdollisti usean puun yhtäaikaisten CH_4 -voiden mittaukset. Puiden rinnankorkeusläpimitta vaihteli välillä 8,5–12,8 cm ja pituus välillä 7,3–12,5 m (Taulukko 1). Puiden ikää ei voitu arvioida tarkasti, koska vuomittausten takia runkojen ei ollut mahdollista. Koealaa ympäröivä metsä on noin 50-vuotiaasta mäntymetsää, joka on uudistettu

kylvämällä vuonna 1962 (Hari ja Kulmala 2005). Koska kasvuolosuhteet ovat koealan korkean vedenpinnan takia heikkommat kuin ympäröivässä kivennäismaan vartuneemmassa männikössä, on mahdollista, että koepuumme ovat samaa ikäluokkaa ympäröivän metsän kanssa.

Kivennäismaalla olleelta kuivahkon kankaan koealta valittiin koepuuksi noin 50 - vuotias ja terve hieskoivu. Kuusia ei ollut kuivahkon kankaan koealan mittaustornin läheisyydessä.

Taulukko 1. Koealojen koepuiden rinnankorkeuden läpimitat ja korkeudet, sekä runko- ja oksakammioiden sijainnit koepuiden eri korkeuksilla. Koeala MkK on soistunut alue ja VT kivennäismaa-alueen kuivahko kangas. Kammioiden sijaintikorkeudet on mitattu maan pinnasta kammion alareunaan.

Koeala	Koepuun nro. / Puulaji	$d_{1,3}$ (cm)	h (m)	Runkokammioiden sijaintikorkeus (m)			Oksakammioiden sijaintikorkeus (m)		
				I	II	III	OA	OB	OC
MkK	1 / <i>B. pubescens</i>	11,3	9,5	0,5	3,7	4,9	8,2	10,0	
MkK	2 / <i>B. pubescens</i>	12,9	8,6	0,5	3,5	5,2	7,5	8,8	
MkK	3 / <i>P. abies</i>	8,5	7,3	0,2	2,9	4,9	7,2	7,8	
MkK	4 / <i>P. abies</i>	12,1	12,5	0,5	2,9	5,8	8,6		
VT	5 / <i>B. pubescens</i>	19,5	19,6	0,3	3,5	7,3	15,2	15,2	14,3

2.3 Metaanivoiden mittaaminen kammiomittausmenetelmällä

Metaanivuota mitattiin staattisella kammiomittausmenetelmällä rungoista, oksista ja maaperästä. Kammiot asennettiin puiden runkojen ja oksien ympärille siten, että ne voitiin mittausten ajaksi sulkea ilmatiiviisti. Maakammioita varten maahan oli asennettu kaulukset, joihin kammiot pystytettiin asettamaan ilmatiiviisti. Runko- ja oksakammioissa oli sähkömoottorilla toimiva pumppu, joka kierrätti kammioiden sisäistä ilmaa näytteenottoletkujen lävitse. Lisäksi kammioiden sisälle asennettiin tuuletin tehostamaan kammion sisäisen ilman kierrätystä ja sekoittumista (kaikille muille paitsi rasiamaaisille runkokammioille, ks. 2.4.2 Runkokammiot).

Näytteenotto tapahtui imemällä kammiosta kaasunäyte (20 ml runko- ja oksakammiot; 65 ml maakammiot) näyteruiskuun (BD Plastik™, Becton, Dickinson and

Company, New Jersey, USA), josta se siirrettiin heti vakumoituu lasiseen näyteputkeen (12 ml, Labco Exentainer®, Labco Limited, Wales, UK). Näyteputkessa oleva kaasunäyte oli näin ollen ylipaineistettu, jotta näytteen analysointi kaasukromatografilla onnistuisi mahdollisimman hyvin. Näytteenottomenetelmä kammioineen on sama kuin Machacova ym. (2016) tutkimuksissa.

2.3.1 Maakammiot

Soistuneen alueen puiden läheisyydestä mitattiin metsäpohjan CH₄-vuo manuaalisesti maakammioilla (Pihlatie ym. 2013, Halmeenmäki 2014) (Kuva 3) aina samanaikaisesti puiden vuomittausten kanssa. Maakammio mittauksissa käytettiin 75 minuutin sulkuaikaa siten, että näytteenottoajat olivat 1, 5, 15, 25, 35, 55 ja 75 minuuttia kammion sulkemisen jälkeen. Kammiot peittivät 55 cm x 55 cm pinta-alan ja niiden korkeus oli noin 30 cm kauluksen kanssa. Metsäkortekorvessa käytössä oli 3 maakammiota. Kuivahkolla kankaalla metsänpohjan CH₄-vuota mitattiin automaattikammioilla kerran vuorokaudessa iltapäivällä, mikä oli aina samanaikaisesti puumittausten kanssa. Automaattikammioilla käytettiin 50 minuutin sulkuaikaa ja näytteenottoajat olivat 1, 5, 10, 20, 30, ja 50 minuuttia sulkemisen jälkeen. Kammio oli samaa kokoluokkaa manuaalikammioiden kanssa.



Kuva 3. Manuaalinen maakammio metsäkortekorvessa (MkK). Kammion päällä on letkulla varustettu tulppa, jonka kautta näytteenotto tapahtui. Tulppaan oli kiinnitetty myös lämpöanturi, jonka kautta kammion sisäistä lämpötilaa voitiin mitata.

2.3.2 Runkokammiot

Runkokammioilla yhden mittauksen sulkuaika oli 5 tuntia, minkä aikana kustakin kammioista otettiin 9 näytettä. Näytteenottoajat olivat 0, 30, 60, 90, 120, 160, 200, 250 ja 300 minuuttia kammioiden sulkemisen jälkeen. Näytteenotto tapahtui näytteenottoletkuihin kiinnitetyn, septumilla varustetun venttiilin kautta.

Runkokammioita oli kahdenlaisia: rungon ympärille koottavia sylinterikammioita ja rungon pintaan kiinnitettäviä rasiakammioita (Kuva 4). Sylinterikammioita käytettiin pienen läpimitan omaavilla puilla soistuneella koealalla ja pienemmän runkopintalan peittäviä rasiakammioita isokokoisemmalla puulla kuivahkolla kankaalla. Soistuneella alueella runkokammiot koottiin ilmatiiviisti rungon ympärille noin 30 cm korkuiseksi sylinteriksi. Ennen kammioiden asennusta, kammioiden kiinnityskohta puhdistettiin jäkälästä ja muista pinnan epätasaisuutta aiheuttavista tekijöistä, kuitenkin vaurioittamatta puun kuorta. Kiinnityskohtaan kiinnitettiin silikoni tiivisteliimalla neopreeni-pehmustetta, minkä päälle kammion kelmu tai rasia asennettiin. Sylinterimäisissä kammioissa kelmu pingotettiin teräsvaijerista tehtyjen tukirankojen päälle, jotta kammion ja rungon väliin jäi ilmatila. Molemmissa runkokammiotyypeissä kammion sisäpinta oli noin 4–6 cm etäisyydellä rungosta. Runkokammioita asennettiin molempien koealojen koepuihin kolmelle eri korkeudelle (Taulukko 1).

Sylinterimäisiin runkokammioihin kertyi mittausten välisenä aikana hiilidioksidia, joten kammiot oli huuhdeltava ulkoilmalla ennen mittausten aloittamista niin kauan, että CO₂-pitoisuus vastasi ulkoilmaa. Rasiamaisten kammioiden kansi voitiin ottaa mittausten väliseksi ajaksi irti, joten niille vastaavanlaista toimenpidettä ei tarvinnut suorittaa.



Kuva 4. Koepuiden runkoihin asennettiin kahdenlaisia runkokammioita. Kuvassa oikealla oleva rasia-mainen kammiotyyppi oli käytössä kuivahkolla kankaalla, ja soistuneella koealalla käytettiin vasemmanpuoleisen tyyppisiä, lieriömäisiä kammioita. Kuvassa olevat koepuut eivät liity tähän työhön.

2.3.3 Oksakammiot

Oksakammioiden (Kuva 5) rungot koottiin Helsingin yliopiston fysiikan laitoksen pajassa ja koealoilla ne voitiin kiinnittää suoraan mittastorniin. Kammiot olivat pituudeltaan noin 29 cm ja läpimitaltaan 15 cm ja ne asennettiin oksien kärkeen siten että niiden sisälle voitiin asettaa oksia noin 20 cm pituudelta kärjistä mitattuna. Näin ollen oksat pystyivät esteettä jatkamaan pituuskasvuaan. Oksakammioita asennettiin metsäkortekorven koealalla koivuihin 4 kappaletta kuhunkin ja kuusiin 3 kuhunkin. Kuivahkon kankaan koepuuhun asennettiin 3 oksakammiota (Taulukko 1).



Kuva 5. Yksittäinen koivun oksakammio kuivahkolla kankaalla.

2.4 Taustamuuttujat

Tavanomaisimmista taustamuuttujista ilman lämpötila (Pt 100, RTD, USA) 4,2 metrin korkeudelta ja sademäärät (FD12P, Vaisala, Finland) 18 metrin korkeudelta saatiin SMEAR II aseman SmartSMEAR tietokannasta¹. Metaanivuohon vaikuttavien tekijöiden ja metaanin syntyperän arvioimiseksi vuota verrattiin myös taustamuuttujiin, joita mitattiin jatkuvatoimisesti koeloilla ja SMEAR II asemalla.

Tässä tutkimuksessa Puiden CH₄-vuohon mahdollisesti vaikuttavista tekijöistä huomioitiin koepuista mitatut mahlan virtausnopeudet, maan lämpötila sekä UV-säteily. Kustakin koepuusta mahlan virtausnopeutta mitattiin Granierin (1987) esittelemällä tekniikalla, joka perustuu kahden 2 cm syvälle (mantopuuhun yltävien) runkoon kiinnitetyn anturin mittaamaan lämpötilaeroon. Kun toista anturia lämmitetään vakiovirralla, lämpötilaero ja siinä tapahtuvat muutokset kertovat mahlan virtausnopeudesta (Hölttä ym. 2010). Maan lämpötiloja mitattiin 5:n ja 10 cm syvyyksistä molemmilla koeloilla. Metsäkortekorven maalämpötilat tallennettiin eri syvyyksille asennettuihin lämpötila-antureihin (iButton, Maxin Integrated Products, USA) ja kuivahkon kankaan maalämpötilat saatiin SmartSMEAR tietokannoista (KTY81-110, NXP, USA). UV-säteilyä mitattiin SMEAR II -aseman mastosta 18 metrin korkeudesta (501A, Solar Light Company, USA) ja aineisto saatiin SmarySMEAR tietokannasta.

Muita tarkastelussa olleita taustamuuttujia olivat PAR-säteily, maan kosteus, latvuston yläpuolinen CH₄-vuo, evapotranspiraatio ja ekosysteemin tasolla tapahtuva hiilensidonta (engl. *Net ecosystem exchange*, NEE). PAR-säteilyä mitattiin erikseen metsäkortekorvessa mittaustorniin 7–9 metrin korkeudelle kiinnitettyjen PAR-antureiden (Li-Cor Quantum sensor, LI-COR Biosciences, Nebraska, USA, ja VTB8440BH photodiode, Excelitas Technologies Corp., Massachusetts, USA) avulla. Kuivahkoa kangasta koskeva PAR-aineisto otettiin smartSMEAR -tietokannasta, jonka PAR-arvot oli mitattu 18 metrin korkeudesta (LI 190SZ, LI-COR Inc., USA). Maan kosteutta mitattiin CH₄-vuon mittausten yhteydessä aina kolmesta eri pisteestä jokaisen koepuun ympäriltä (HH2, Delta-T Devices Ltd, UK). Tarkasteltaessa kasvukauden aikaisen sadekertymän ja maankosteuden välistä yhteyttä käytettiin SMEAR II asemalla 10 cm syvyyshorisontissa jatkuvatoimisesti mitattuja maan

¹ (<http://avaa.tdata.fi/web/avaa/-/smartsmeaar>)

kosteusarvoja (TDR100, Campbell Scientific, USA). Latvuston yläpuolella tapahtuva CH₄-vuo (G301, Picarro Inc., USA) ja haihdunta sekä ekosysteemin tasolla tapahtuva hiilensidonta saatiin smartSMEAR tietokannoista.

2.5 Aineiston käsittely, laskenta ja analyysi

2.5.1 Kaasuanalyysit

Näytteiden kaasupitoisuudet analysoitiin Helsingin yliopiston Hyytiälän metsäseman kaasukromatografilla (7890A, Agilent Technologies, Kalifornia, USA). Metaanipitoisuuksien analysointiin käytetty detektori oli liekki-ionisaatiodetektori (engl. *flame ionization detector*, FID). Lisäksi käytössä oli automaattinen näytteensyöttölaite (GX-271, Liquid Handler, Gilson Inc., Middelton, USA). Analysointien kantajakaasuna käytettiin heliumia virtausnopeudella 45 ml/min. Kaasukromatografian uuni sisälsi esikolonnin (80/100 Porapak Q, 2,74 m) ja analyttisen kolonnin (80/100 HayeSep Q, 1,83 m), joiden virtausnopeudet olivat 22 ml/min ja 8,4 ml/min. Lämpötila uunissa oli 60 °C ja detektorissa 300 °C. Liekkikaasuna käytettiin synteettistä ilmaa (450 ml/min) ja vetyä (H₂, 45 ml/min) ja apukaasuna typpeä (N₂, 5 ml/min) lisäämään detektorin herkkyyttä.

Kaasukromatografia antaa kustakin näytteestä CH₄-pitoisuudet pinta-aloina, jotka ovat suoraan verrannollisia näytteen kaasupitoisuuksiin. Pitoisuuksien laskemiseksi näyteajoihin sisällytettiin tunnettuja pitoisuuksia eli standardikaasunäytteitä (1,207; 1,810; 2,413; 3,017 ppm metaania synteettisessä ilmassa). Vertailemalla näytteistä saatuja pinta-aloja standardikaasujen pinta-aloihin, voitiin kullekin näytteelle laskea tarkat kaasupitoisuudet.

2.5.2 Metaanivoiden laskeminen

Metaanivuot laskettiin kaasunäytteistä saatujen pitoisuuksien muutoksena ajassa ja suhteutettuna mitattavaan pinta-alaan tai kuivapainoon. Runkojen vuot suhteutettiin kammion sisällä olevan puunkuoren pinta-alaan. Vastaavasti oksakammioiden vuot oksien kuivamassaan lehtineen/neulasineen.

Kaasukromatografiasta saatujen CH₄-pitoisuuksien joukossa esiintyi havaintojoukosta poikkeavia arvoja (engl. *outlier*), jotka aiheuttavat vääristymiä voiden laskemisessa. Yksittäisten havaintojen poikkeavuus voi johtua muun muassa näytteenotossa tapahtuneista virheistä, vuotavasta näyteputkesta tai kaasukromatografian virheellisestä toiminnasta. Tämän takia aineistolle tehtiin ennen voiden laskemista lineaarinen robust fit -sovitus, jonka avulla aineistosta poistettiin virheelliset pitoisuusarvot (outlier -arvot). Robust fit -sovitus antaa jokaiselle kammionmittauksen pitoisuuspis- teelle painoarvon perustuen mitatun pitoisuuden ja lineaarisen sovituksen etäisyy- teen. Poikkeaviksi havainnoiksi tulkittiin painoarvoltaan alle 0,9 olevat pitoisuuspis- teet. Kun virheelliset mittauservot oli poistettu, vuot laskettiin käyttämällä lineaarista sovitus (Pedersen ym. 2010). Sekä robust fit -sovitus että CH₄-voiden laskeminen tehtiin MatLab -ohjelmistolla (MatLab R2014a, The Mathworks Inc., Massachusetts, USA). Pinta-aloihin pohjautuvat vuovarvot (μg CH₄ m⁻² h⁻¹) laskettiin kaavalla:

$$F_0 = S \frac{V}{A} \frac{M}{V_m} \frac{273,16}{273,16 + T} 3600$$

missä S on käytettävän sovituksen (tässä tapauksessa lineaarisen) kulmakerroin (ppm s⁻¹), V kammion tilavuus (m³), A kammion peittämän rungon kuoren pinta-ala (m²), M metaanin molekyylimassa (16,042 g mol⁻¹), V_m ideaalikaasun moolitilavuus (0,0224 m³ mol⁻¹) ja T kammion sisäinen lämpötila (°C) (Pihlatie ym. 2013). Vastaa- vasti vuot laskettiin oksille suhteutettuna niiden kuivapainoon (μg CH₄ g⁻¹ h⁻¹) kaa- valla:

$$F_0 = S \frac{V}{DW} \frac{M}{V_m} \frac{273,16}{273,16 + T} 3600$$

missä DW on oksien ja lehtien/neulasten kuivamassa (g). Lasketuille CH₄-voille teh- tiin vielä karsinta niiden NRMSE (*Normalized Root Mean Squared Error*) -arvoihin perustuen siten, että vuot joiden NRMSE jäi alle 0,35 otettiin mukaan lopulliseen ai- neistoon. Tämän jälkeen jäljelle jäi enää vain kaikkein luotettavimpiin pitoisuusar- voihin perustuvat vuot.

2.5.3 Metaanivoiden laskenta puu- ja metsikkötasolle

Tulokset yleistettiin ensin puutasolle ja sitten karkeasti hehtaarikohtaiseksi koskemaan samaa metsä-/suotyyppiä. Koska rungon CH₄-vuot oli suhteutettu rungon pinta-alaan ja oksien vuo niiden kuivapainoon, oli käytettävä erilaisia mallinnusmenetelmiä koko puun kuoripinta-alan ja latvuksen oksien kuivapainon määrittämiseksi. Lisäksi soistuneella alueella koivujen runkojen CH₄-vuossa oli voimakas korkeusriippuvuus, mikä mahdollisti CH₄-vuon mallintamisen korkeuden funktiona.

Runkojen metaanivuon yleistäminen puutasolle

Jokaiselle soistuneen alueen koepuulle laskettiin kuoren pinta-alat hyödyntäen useilta eri korkeuksilta mitattuja ristiläpimittoja. Soistuneella kasvupaikalla ristiläpimittoja mitattiin kustakin puusta noin kolmelta eri korkeudelta ja niiden avulla yksittäisen puun pinta-ala saatiin laskemalla yhteen katkaistujen kartioiden pinta-ala. Kuivahkolla kankaalla käytössä ei ollut useammalta korkeudelta mitattuja ristiläpimittoja, vaan puun pinta-ala laskettiin kartion kaavalla perustuen puun korkeuteen ja rinnan-korkeusläpimittaan. Kuivahkolla kankaalla puutason rungon CH₄-vuo laskettiin kertomalla neliömetriä kohden mitattu rungon keskimääräinen CH₄-vuo puunrungon pinta-alalla.

Koska soistuneella alueella koivujen runkojen CH₄-vuo pieneni säännönmukaisesti puiden korkeuden mukaan, tehtiin koivujen runkojen CH₄-vuolle yksinkertainen korkeudesta riippuva malli. Malli luotiin Microsoft Excelin trendline-kuvaajatyökalulla seuraavasti:

$$f(x) = 128,47e^{-1,271x}$$

missä $f(x)$ on CH₄-vuo puun korkeudella x ($R^2 = 0,9464$). Tämä eksponentiaalinen vuomalli integroitiin määrättyllä integraalilla koko puun pituudelle, jolloin saatiin tulokseksi CH₄-vuo koko puulle pinta-alayksikköä kohden:

$$F(x) = \int_0^h 128,47e^{-1,271x} dx$$

missä h on puun pituus. Kun puun pituuteen perustuva puukohtainen rungon vuo kerrotaan kuoren pinta-alalla, saadaan runkoa koskeva kokonaismetaanivuo.

Kuusien runkokammioiden CH_4 -vuo ei vaihdellut puun korkeuden suhteen yhtä merkittävästi tai selkeästi, joten runkojen vuo laskettiin kammioiden vuokeskiarvoihin perustuen.

Oksien metaanivuon yleistäminen puutasolle

Marklund (1988) ja Repola (2008, 2009) ovat esittäneet Pohjoismaisiin metsiin soveltuvia kuusen ja koivun biomassamalleja, joilla voidaan arvioida puun eri osille kuivamassat. Tässä työssä päädyttiin hyödyntämään toistaiseksi laajemmin hyväksytyjä ja käytössä olevia Marklundin (1988) malleja. Marklundin (1988) julkaisemat biomassamallit ovat olleet laajassa käytössä Fennoskandian alueella: niitä on hyödynnetty metsätaloudessa arvioitaessa energiapuuksi soveltuvan biomassan määrää, mutta niiden on huomattu olevan käyttökelpoisia myös pohjoismaisten metsien hiilitaseiden arvioinnissa. Niiden suosio perustuu niiden riittävään tarkkuuteen, mutta myös siihen, että niihin syötettävät parametrit ovat ainoastaan rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Repolan (2008, 2009) mallien kohdalla on korostettu niiden mahdollista soveltumattomuutta suometsiä koskevan puuston biomassojen arvioimiseen, vaikkei myöskään Marklundin (1988) malleja ole ensisijaisesti tarkoitettu turvemaiden olevien puiden biomassojen mallintamiseen. Pohjoismaisten soiden puustoon erikoistuneita biomassamalleja ei ole toistaiseksi kuitenkaan kehitetty. Koivujen elävien oksien biomassa ilman lehtiä ($DW_{koivu,o}$) laskettiin kaavalla:

$$DW_{koivu,o} = \exp\left(10,2806 * \frac{d}{d + 10} - 3,3633\right)$$

missä d on puun rinnankorkeusläpimitta (Marklund 1988). Koivuille laskettiin erikseen myös lehtien biomassa ($DW_{koivu,l}$) kaavalla:

$$DW_{koivu,l} = \exp\left[12,1095 * \frac{d}{d + 7} + 0,0413 * h - 1,565 * \ln(h) - 3,4781\right]$$

missä h on puun korkeus (Marklund 1988). Marklundin (1988) malleissa ei eritelty kuusen neulasten biomassaa oksista, joten kuusten elävien oksien ja neulasten yhteisbiomassa ($DW_{kuusi,o+n}$) laskettiin kaavalla:

$$DW_{kuusi,o+n} = \exp \left[10,9708 * \frac{d}{d + 13} - 0,0124 * h - 0,4923 * \ln(h) - 1,20663 \right]$$

Tulosten yleistäminen useamman eri tyyppin metsille ei ole yksiselitteistä. Rungoista emittoituvan metaanin alkuperän on arveltu olevan maan hapettomissa olosuhteissa (Rusch ja Rennenberg 1998, Pangala ym. 2013), mikä tulee huomioida tarkastelussa. Näin ollen voidaan todennäköisin syin sanoa metaanin emittoitumisen olevan yhteydessä kasvupaikan vesitalouteen. Koska tutkimus on rajattu vain kahdelle koealalle, joista toisella on käytettävissä vain yhdestä puusta kerätyt tiedot, ei kasvupaikkatyyppin ja vesitalouden muutosten vaikutusta CH₄-vuohon voida luotettavasti arvioida. Tästä syystä tulokset yleistetään koskemaan metsää, joka vastaa kasvupaikaltaan ja vesitaloudeltaan koealoja.

2.5.4 Tilastolliset menetelmät

Tulosten käsittely ja tilastollinen analyysi tehtiin käyttämällä avoimen lähdekoodin R-ohjelmistoa (3.0.2) ja SPSS:ää (versio 23, IBM SPSS Statistics). Tilastollisista tunnusluvuista keskiarvo, mediaani, ylä- ja alaneljännekset on esitetty liitteen 1 taulukoissa 1 ja 2. Metaanivoiden normaalijakautuneisuutta testattiin Shapiro-Wilk -testillä koskien koko aineistoa sekä tarvittaessa pienempiä osa aineistoja. Varianssien yhtäsuuruuden testaamiseen käytettiin Levene-testiä.

Mittauskauden aikaisia vuokeskiarvojen eroja sekä ulkoisten muuttujien vaikutusta vuohon testattiin tilastollisilla menetelmillä. Riippumattomien otosten kohdalla voidaan erilaisuutta puulajien, mittauskorkeuksien ja kasvupaikkojen välillä testattiin aineiston normaalijakautuneisuudesta ja varianssien samankaltaisuudesta riippuen yksisuuntaisella varianssianalyysillä, Kruksal-Wallisn varianssianalyysillä tai Welchin varianssianalyysillä. Riippuvien otosten testaamiseen on käytetty Friedman-testiä silloin, kun otokset eivät olleet normaalijakautuneita. Kahden ryhmän väliset vertailut tehtiin Mann-Whitneyn U-testillä.

Metaanivoiden ja ulkoisten muuttujien välistä korrelaatiota tarkasteltiin Spearmanin korrelaatioilla. Kaikki testit toteutettiin käyttäen 5 %:n luottamustasoa.

3. Tulokset

Metaanivuossa ilmeni vaihtelua kasvupaikkojen, puulajien ja puun eri osien välillä. Havaittujen CH₄-voiden hajonta oli kokonaisuudessaan suurta: rungoista, oksista ja maasta havaittiin sekä metaanin sitoutumista että vapautumista, niiden toimiessa pääsääntöisesti kuitenkin metaanin lähteinä. Sillä, tehtiinkö mittaukset yöllä vai päivällä, ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta havaittuun CH₄-vuohon.

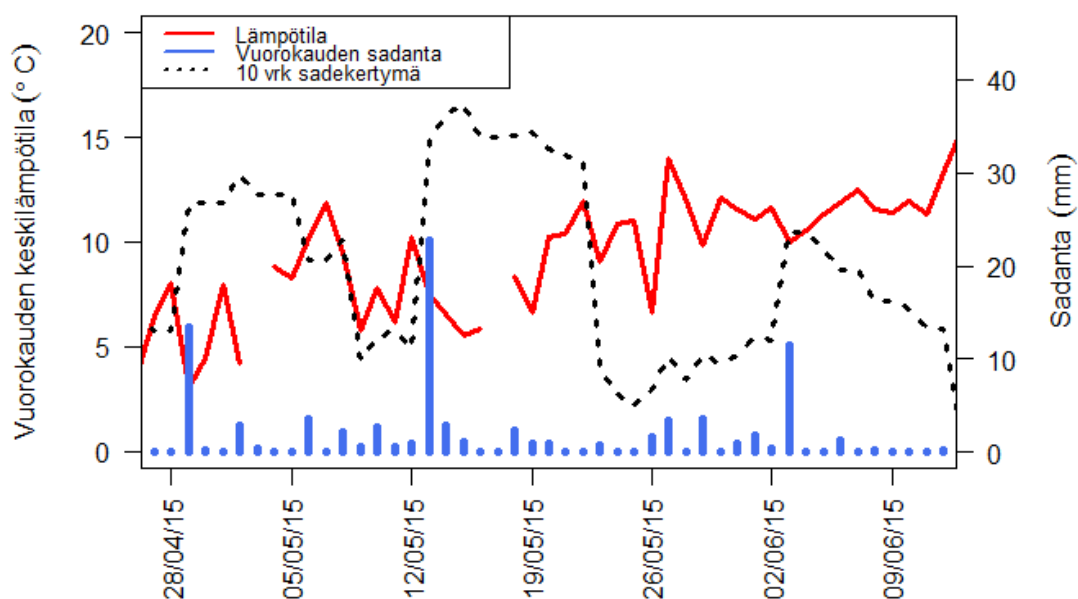
3.1 Taustamuuttujat

Mittauskauden aikaisia ja CH₄-vuohon vaikuttavia taustatekijöitä oli mahdollista tarkastella sekä koealoilla että SMEAR II asemalla jatkuvatoimisesti käynnissä olleiden mittausten avulla. Koska mittaukset ajoittuivat kasvukauden alkuun, monissa CH₄-vuohon mahdollisesti vaikuttavissa tekijöissä tapahtui suuria muutoksia (esim. ilman ja maan lämpötila, säteily).

3.1.1 Ilman lämpötila ja sademäärä

Ilmatieteen laitoksen lämpötilaseurannan mukaan terminen kasvukausi alkoi Hyytiälässä 8.4.2015. Ilman lämpötila kasvoi tasaisesti koko mittauskauden ajan vaikkakin toukokuun 12. päivän aikoihin voimakkaiden sateiden yhteydessä vuorokauden keskilämpötilat hieman laskivat (Kuva 6). Toukokuun puoliväli oli 10 vuorokauden sadekertymän perusteella mittauskauden sateisinta aikaa (Kuva 6). Tänä aikana maastossa oli havaittavissa selvää lehtien kasvun hidastumista. Tultaessa

kesäkuun alkuun vuorokausittainen keskilämpötila ei enää vaihdellut yhtä voimakkaasti ja sen kasvu oli tasaisempaa mittauskauden loppuun saakka (Kuva 6).



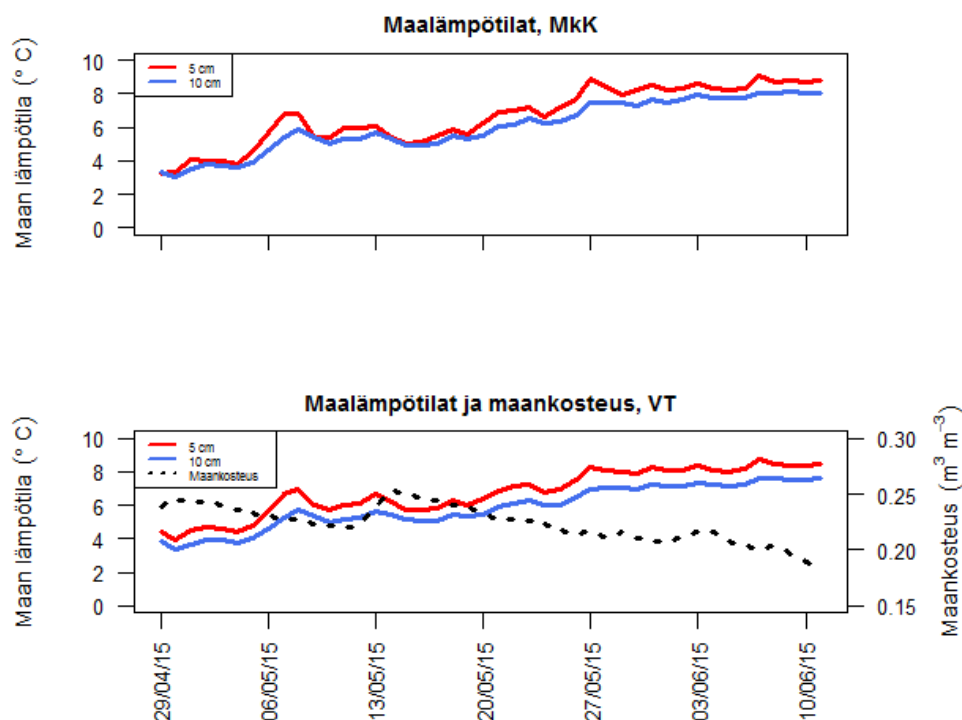
Kuva 6. Vuorokausittaisen keskilämpötilan, sadannan ja 10 vuorokauden sadekertymän vaihtelu 28.4.–11.6.2015 Hyytiälässä.

3.1.2 Maan lämpötila ja kosteus

Maan lämpötila 5 ja 10 cm syvyydessä kohosi tasaisesti koko mittausjakson ajan molemmilla koealoilla (Kuva 7). Soistuneella koealalla maan lämpötila 5 cm syvyydessä oli keskiarvoisesti lähes samalla tasolla 10 cm syvyydestä mitattujen lämpötilojen kanssa, vaikka lämpötilan vaihteluväli vaikutti lievästi suuremmalta 5 cm syvyydellä (Kuva 7). Mittauskauden aikana soistuneen kasvupaikan maan lämpötila vaihteli välillä 2,2–10,9 °C keskilämpötilan ollessa 5 cm syvyydessä 6,7 °C ja 10 cm syvyydessä 6,1 °C.

Kuivahkon kankaan koealalla eri syvyyksiltä mitatuissa lämpötiloissa oli selkeämpi ero: syvemmältä mitatut lämpötilat ovat säännönmukaisesti yhden asteen matalampia kuin lämpötilat lähempänä pintaa. Kuivahkon kankaan maan lämpötilat vaihtelivat välillä 3,2–9,1 °C ja mittauskauden keskilämpötila 5 cm syvyydessä oli 6,7 °C ja 10 cm syvyydessä 5,8 °C. Soistuneen kasvupaikan lämpötiloilla oli siis suurempi vaihteluväli.

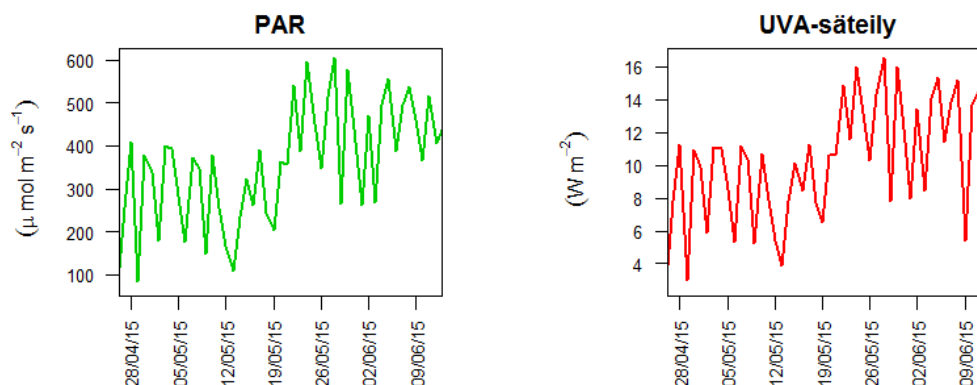
Viikoittaiset maankosteusmittaukset osoittivat, että soistuneella kasvupaikalla vedenpinnan taso oli koko mittauskauden ajan lähellä maanpintaa (n. 5–10 cm syvyydessä). Tästä syystä maan kosteus soistuneella kasvupaikalla oli lähes aina 100 %. Veden läsnäolo vaikuttanee maan eri kerrosten keskilämpötilojen samankaltaisuuteen kyseisellä kasvupaikalla. Kuivahkolla kankaalla maan kosteus oli mittauskauden aikana pääasiassa laskussa, mutta toukokuun sateisuus nosti sen korkeammalle kuin se oli mittauskauden alussa (Kuva 7).



Kuva 7. Maalämpötilat soistuneella koealalla ja kuivahkolla kankaalla 29.4.–11.6.2015. Kuivahkon kankaan lämpötila kuvaajassa on myös maankosteus, joka soistuneella alueella oli aina lähes 100 %. Suureet on ilmaistu vuorokauden keskiarvoina.

3.1.3 Säteily

Säteilyolosuhteet olivat mittausjaksolla vaihtelevia ja erot päivien välisessä säteilykertymässä olivat toisinaan hyvinkin suuria. Vaihtelu säteilykertymässä on rinnasteinen sademääriin, ja pilviset päivät olivatkin usein sateisia. PAR-säteilyn vuorokautinen kertymä oli toukokuun loppuun saakka samalla tasolla, mutta 21.5. alkaen vuorokausikertymä selkeästi kohosi (Kuva 8). Vastaavasti, tuolloin myös sateet harvenivat (Kuva 6). UV-säteilyn kohdalla nähtiin samanlainen rinnasteisuus.

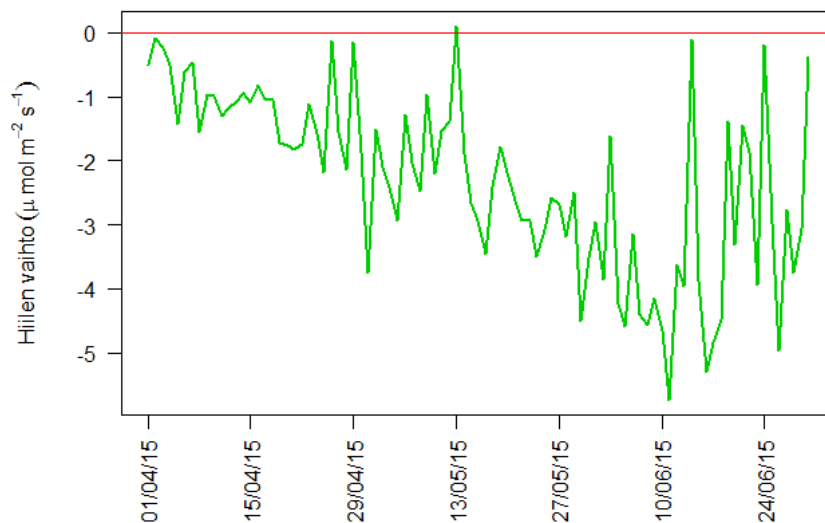


Kuva 8. Fotosynteesistä aktiivisen ja UVA-säteilyn määrät vuorokauden keskiarvoina 28.4.–11.6.2015 latvuston yläpuolella 18 m korkeudessa SMEAR II asemalla.

3.1.4 Lehtipinta-alan kehitys ja metsikkötason hiilensidonta

Koivujen oksakammioissa lehtien puhkeaminen käynnistyi toisen mittausviikon aikana (alkaen 5.5.2015) molemmilla koealoilla ja niiden kasvu oli nopeinta 15.5.–30.5. välisenä aikana. Sen jälkeen kasvu hidastui, mutta jatkui mittausjakson loppuun saakka. Oksakammioiden sisällä kasvaneiden oksien lehdet puhkesivat ja kehittyivät noin viikon etuajassa kammion ulkopuolisiin lehtiin verrattuna. Kuusien oksakammioissa uusien neulasvuosikertojen puhkeaminen alkoi 26.5. ja ne kasvoivat mittausajanjakson päättymiseen mennessä 5–10 cm. Kuusien neulasvuosikertojen puhkeamisessa ei ollut suurta eroa verrattaessa kammioiden sisällä ja ulkopuolella olleita oksia.

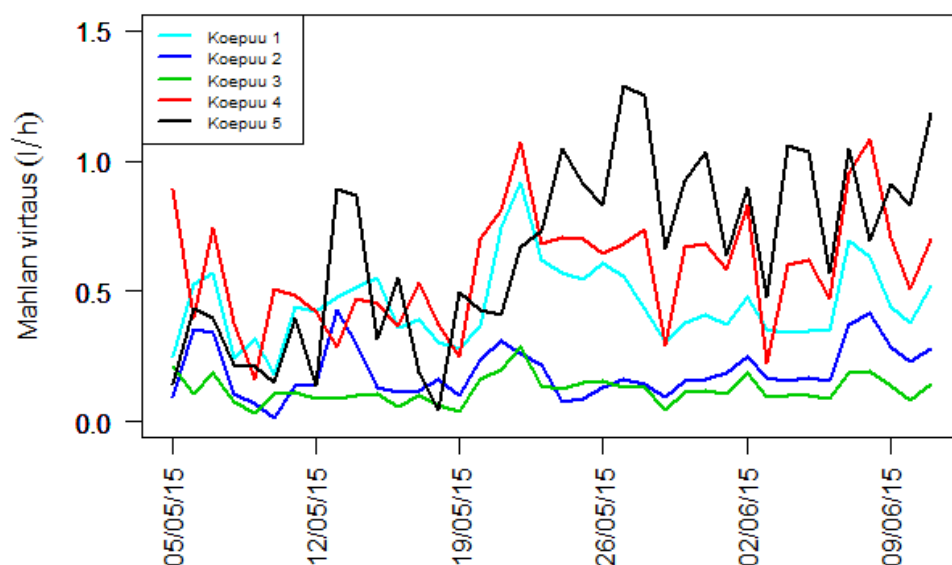
Hiilidioksidin sitoutuminen SMEAR II aseman metsikköön oli vuorokausittain vaihtelevaa ja vaikutti vähenevän voimakkaiden sateiden yhteydessä (Kuva 9). Matalimmat vuorokaudenaikaiset keskiarvot hiilidioksidin sidonnassa osuvat sateisimpien päivien kohdalle (vrt. Kuva 6). Hiilidioksidin sitoutumisessa on nähtävissä myös voimistumista ajalla (15.5.–30.5.), jolloin myös lehtien kehityksen todettiin olevan nopeimmillaan.



Kuva 9. Ekosysteemin tasolla tapahtuva hiilidioksidin vaihto kasvukauden alussa 1.4.–30.6.2015 mitattuna SMEAR II aseman metsikön päältä pyörrekovarianssi-tekniikalla. Arvot ovat vuorokauden keskiarvoja, negatiiviset arvot tarkoittavat hiilidioksidin sitoutumista ja positiiviset vapautumista.

3.1.5 Mahlan virtaus

Mahlan virtausnopeudessa oli eroja koepuiden välillä. Soistuneella alueella vuorokauden keskimääräinen virtausnopeus vaihteli välillä 0,02–1,08 l/h. Erot virtausnopeudessa olivat enemmän puuyksilö- kuin lajikohtaisia. Vuorokausittainen virtausnopeus oli suurempaa puissa, jotka sijaitsivat selkeästi mättään päällä. Soistuneella koealalla toinen koivuista (koepuu 1) ja kuusista (koepuu 4) oli sijoittunut korkeammalle mättään päälle, kun taas niiden lajiparien juurenniska sijaitsi lähempänä turpeessa olevaa vedenpintaa. Mättäiden päällä kasvavissa puissa havaittiin keskimäärin nopeampaa mahlan virtausta ja ero korostui toukokuun puolivälissä esiintyneen sateisemman jakson jälkeen, jolloin koepuiden 1 ja 4 mahlanvirtaus nopeutui huomattavasti pienen viiveen jälkeen 19.5. alkaen (Kuva 10). Samoihin aikoihin muun muassa PAR-säteilyn määrä kasvoi runsaasti (Kuva 8). Soistuneen koealan koepuiden 1, 3 ja 4 mahlanvirtauksen havaittiinkin korreloivan merkitsevästi ja positiivisesti PAR-säteilyn kanssa mittausajankohdat kattavassa tarkastelussa ($r_s > 0,70$, $p < 0,001$). Kuivahkolla kankaalla mahlan vuorokausittainen virtausnopeus (koepuu 5) oli dynaamikaltaan hieman erilaista kuin soistuneella koealalla ja vaihteli keskimäärin 0,04–1,29 l/h välillä (Kuva 10).



Kuva 10. Mahlan virtaus vuorokauden keskiarvoina 5.5.–11.6.2015. Koepuut 1,2 ja 5 ovat hieskoivuja, koepuut 3 ja 4 kuusia (ks. Taulukko 1).

3.2 Puiden runkojen metaanivuo

Puiden rungoista tutkittiin CH₄-vuon vaihtelua ajallisesti, puun eri korkeuksilla sekä puulajien ja kasvupaikkojen välillä. Koko aineistossa puiden rungoista havaitun CH₄-vuon minimiarvo oli $-30 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$, ja se havaittiin 10.6.2015 kuivahkon kankaan koivusta. Mittauskauden maksimi, $430 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$, havaittiin 11.6.2015 soistuneen kasvupaikan koivusta. Kaikkien runkojen mittauskauden mediaanivuo oli $0,55 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ja keskiarvo $22 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$. Keskiarvon suuruus suhteessa mediaaniin johtuu yksittäisistä suurista vuon arvoista. Runkokammiokohtaisten voiden keskiarvot, mediaanit sekä ylä- ja alaneljännekset on taulukoituna liitteessä 1 (Taulukko 5).

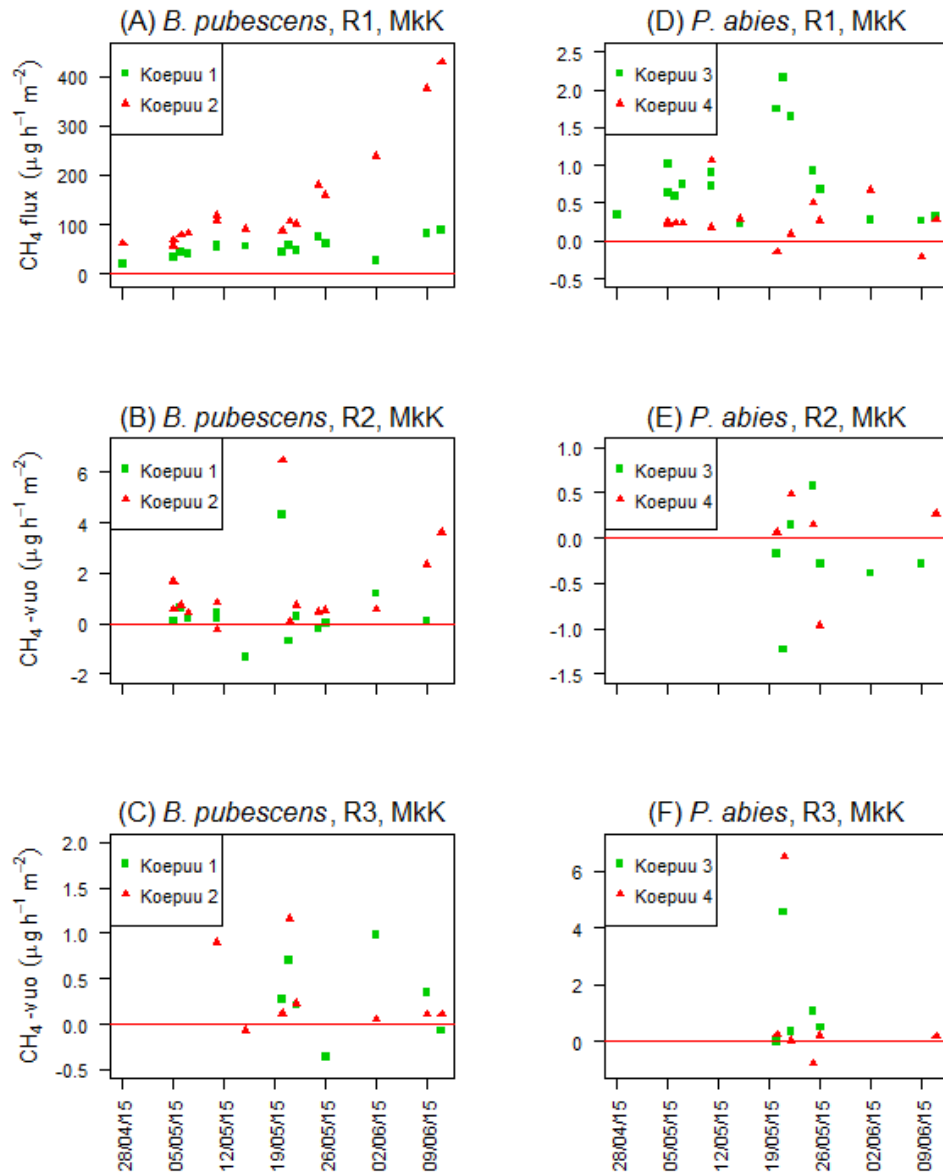
3.2.1 Puiden runkojen metaanivoiden ajallinen vaihtelu

Puiden rungot toimivat CH₄-lähteenä lähes koko mittauskauden ajan aina huhtikuun lopulta kesäkuun puoliväliin saakka (28.4.–11.6.2015). Joissain kammioissa CH₄-päästöt kasvoivat kasvukauden edetessä, mutta päästöjen ajallinen vaihtelu ei noudattanut yhtenevää dynamiikkaa eri korkeuksilla tai puulajien välillä. Kaikkia runkojen

CH₄-voita koskevassa tilastollisessa tarkastelussa ei havaittu merkitseviä eroja mittausviikkojen välillä ($p > 0,05$). Kuitenkin kammioittain tehdyssä tarkastelussa lähimmäksi maata sijoittuvissa mittauksissa havaittiin tilastollisesti merkitsevää vaihtelua hieskoivujen rungon keskiarvoisessa CH₄-vuossa mittausviikkojen välillä ($p = 0,032$).

Soistuneen koealan koivujen alimmalla tasolla havaittiin koko mittauskauden suurimmat positiiviset CH₄-vuot: Vuo kasvoi tasaisesti kasvukauden edetessä vaihdellen välillä 20,0–427,9 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Kuva 11 A). Koivujen runkojen toisella tasolla havaittu CH₄-vuo vaihteli välillä –1,3–6,5 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ja kolmannella tasolla välillä –0,4–1,2 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Kuva 11 B ja C).

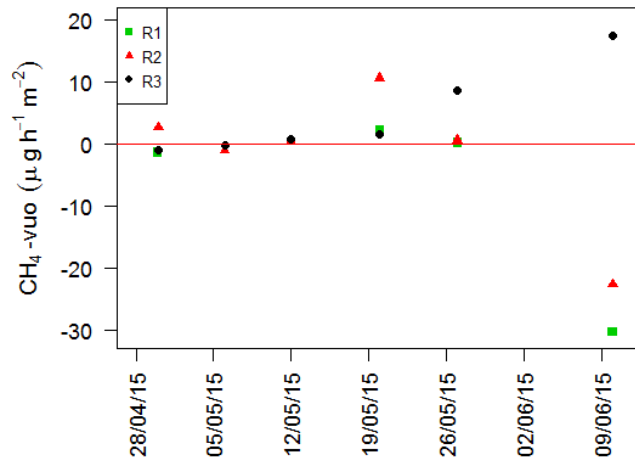
Soistuneella koealalla kasvavien kuusien (koepuut 3 ja 4) lähellä maata olleista kammioista havaittiin lähes yksinomaan CH₄-päästöjä vuon vaihdellessa välillä –0,2–2,2 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Kuva 11 D). Kuusien seuraavalla tasolla mitatut CH₄-vuot vaihtelivat välillä –1,2–0,6 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ja kolmannella tasolla vastaavasti välillä –0,8–6,5 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Kuva 11 E ja F).



Kuva 11. Koivujen ja kuusien runkojen CH₄-vuo mittausjaksolla 28.4.–11.6.2015 metsäkortekorvessa (MkK). R1-R3 kuvaavat korkeutta, jolla runkokammiot olivat: R1 ≈ 0,5 m, R2 ≈ 3,5 m ja R3 ≈ 5,5 m (ks. Taulukko 1).

Kuivahkon kankaan hieskoivun rungon (koepuu 5) CH₄-vuon vaihtelu oli suurta – jos jätetään huomiotta metsäkortekorven koivujen alimmat runkokammiot, vaihteluväli oli suurempi kuin muilla koepuilla (Liite 1, Taulukko 5). Ensimmäisellä tasolla olleesta runkokammioista mitatut vuot vaihtelivat välillä $-30,2$ – $2,3 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ja toisen kerroksen havainnot välillä $-22,7$ – $10,7 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Kuva 12). Kolmannella tasolla olleen runkokammion CH₄-vuon arvot kohosivat tasaisesti koko mittauskauden

ajan arvosta $-0,1 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ arvoon $17,5 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, mutta selkeää dynamiikkaa ei ollut havaittavissa muissa rungon osissa (Kuva 12).

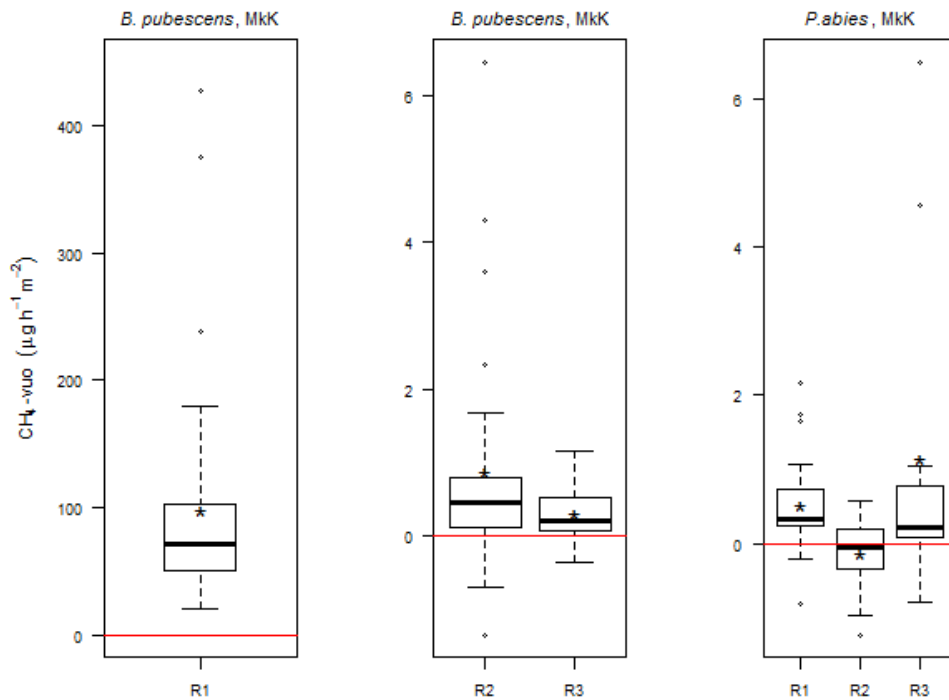


Kuva 12. Hieskoivun rungon CH_4 -vuon ajallinen vaihtelu puun eri korkeuksilla kuivahkolla kankaalla (VT). R1-R3 kuvaavat korkeutta, jolla runkokammiot olivat: R1 $\approx 0,5$ m, R2 $\approx 3,5$ m ja R3 $\approx 7,3$ m (ks. Taulukko 1).

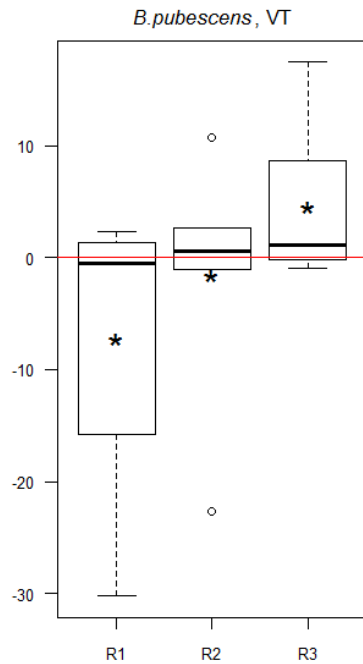
3.2.2 Puiden runkojen metaanivuo runkojen eri korkeuksilta

Puiden rungoista mitattu CH_4 -vuo oli erilaista puiden eri korkeuksilla. Erot olivat erityisen suuria soistuneen kasvupaikan alimpien runkokammioiden osalta, joissa koivuilla oli kasvukauden edetessä selkeä kasvava vuo, kun taas vuon vaihtelu muissa koivujen runkojen osissa ja kuusissa oli epäsäännöllisempää. Soistuneen kasvupaikan koepuiden rungot olivat enimmäkseen metaanin lähteitä, lukuun ottamatta havaintoja kuusien keskimmaisista runkokammioista (korkeudelta 3,5 m, Taulukko 1), jotka enemmän sitoivat kuin vapauttivat metaania mittauskauden aikana (Kuva 13). Koivujen ylemmistä runkokammioista mitattujen voiden mediaanit olivat lähellä toisiaan, vaikka voiden vaihteluväli onkin pienempi ylimmästä kammioista havaituissa CH_4 -voissa (Kuva 13). Soistuneella koealalla eri korkeuksilta havaitussa CH_4 -vuon keskiarvoissa havaittiin tilastollisesti merkitseviä eroja ($\chi^2 = 36$, $df = 2$, $p < 0,05$). Parivertailun perusteella poikkeavat havainnot olivat runkojen alaosissa ($\chi^2 = 1,5$, $p < 0,001$).

Kuivahkolla kankaalla koivun eri korkeuksilta mitattujen voiden mittauskauden keskiarvot eivät eronneet merkitsevästi ($p > 0,05$), vaikka havainnot olivat epäyhtenäisiä: alimmasta kammiosta mitatut CH_4 -vuot olivat koko mittauskauden keskiarvona negatiivisia. Kuitenkin kasvukauden edetessä ylimmästä runkokammiosta havaitut vuot selkeästi kasvoivat (Kuva 12). Puun pituusprofiilissa voidaan nähdä vuon kääntymisen metaanin sitomisesta sen vapauttamiseksi (Kuva 14).



Kuva 13. Metaanivuon vaihtelu lajeittain puun eri korkeuksilla metsäkortekorvessa (MkK). Ruutu- ja janakaaviossa mediaani on merkitty korostetulla viivalla ja keskiarvo tähdellä. Laatikon reunat rajaavat 25 % ja 75 % persentiilit ja janojen päät välin, johon 99 % kyseisestä kammiosta havaituista voista sijoittuu. Huomaa suuruusluokan muuttuminen pystyakselilla.



Kuva 14. Rungon CH₄-vuon vaihtelu hieskoivun eri korkeuksilla kuivahkolla kankaalla (VT).

3.2.3 Puiden runkojen metaanivoiden vaihtelu puulajien ja kasvupaikkojen välillä

Suuruusvaihtelu CH₄-vuossa puulajien välillä oli suurinta maata lähinnä olleissa rungon osissa, ja ylempänä vuon vaihtelu oli hyvin samalla tasolla kuusen ja koivun välillä (Kuva 13). Lajien välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää ero muualla kuin rungon alaosissa ($p < 0,001$). Kuvasta 13 huomataan, että vuossa on puulajien välillä suurta vaihtelua sekä suuruusluokassa että korkeuteen suhteutetussa dynamiikassa. Metaanivuon dynamiikan eroja lajien välillä kuvastaa esimerkiksi se, että kuusien alimmissa kammioissa havaittiin CH₄-päästöjä, jotka vaihtuivat rungossa ylöspäin mentäessä metaanin sidonnaksi, ja jälleen takaisin vapauttamiseksi (Kuva 13). Samalla kasvupaikalla koivujen CH₄-vuon keskiarvo taas laskee eksponentiaalisesti korkeuden kasvaessa. Mittauskauden aikainen vuon vaihteluväli oli myös enimmäkseen suurempi koivuilla kuin kuusilla, vaikka ylempänä kuusen vuon hajonta olikin suurempi (Kuva 13). Kuusien CH₄-päästöjen ei myöskään huomattu kasvavan mittauskauden aikana (ks. luku 3.2.1).

Kasvupaikkojen välisessä vertailussa saman puulajin koivuissa ei havaittu samankaltaisuutta CH₄-vuon dynamiikassa. Kuivahkon kankaan koivun runko toimi alemmista

osistaan pääasiassa CH₄-nieluna, mutta ylin mittauspiste tuotti metaania, mikä on merkittävin ero soistuneen alueen koivuihin verrattuna (Kuvat 13 ja 14). Ajallisessa vaihtelussa voidaan kuitenkin havaita samankaltaisuutta soistuneen alueen koivujen alimpien kammioiden ja kuivahkon kankaan ylimmän runkokammion välillä (Kuvat 11 A ja 12). Tilastollisessa tarkastelussa kasvupaikkojen välisessä koivujen runkojen vuokeskiarvoissa havaittiin merkitseviä eroja, jotka osoittautuivat parivertailussa jälleen kohdistuvan alimpien kerrosten CH₄-voihin ($p < 0,05$).

3.3 Puiden oksien metaanivuo

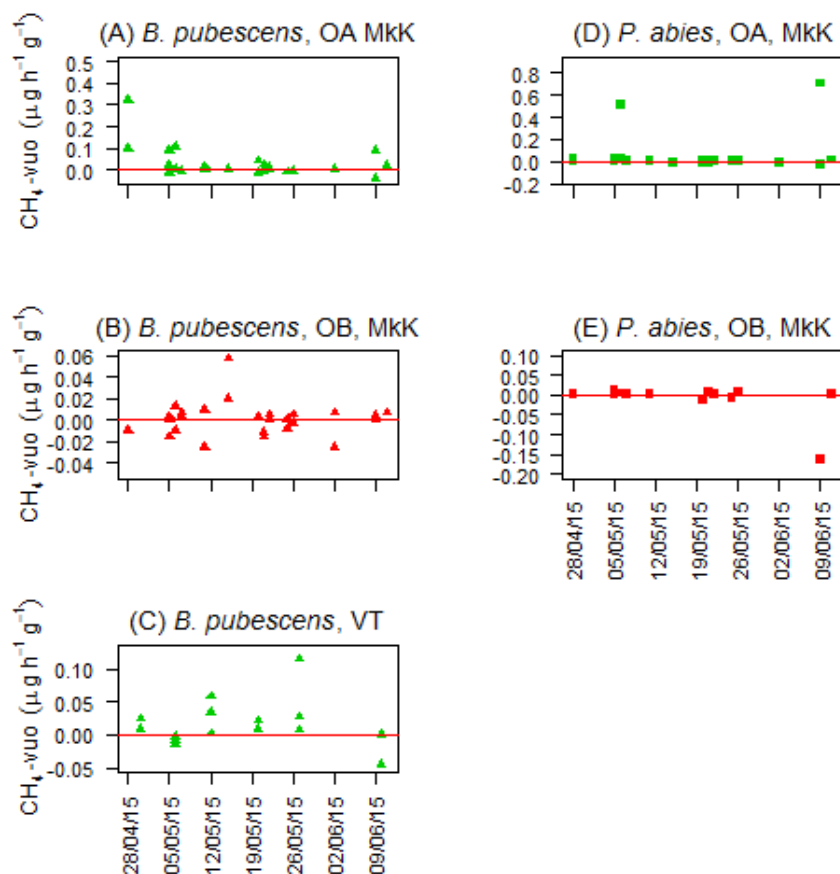
Oksakammioista mitatut CH₄-vuot olivat kokonaisuudessaan huomattavasti pienempiä verrattuna runkokammioihin. Kaikkia oksakammiomittauksia tarkasteltaessa, oksien minimivuo oli $-0,16 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$, maksimivuo $0,70 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$, mediaani $0,003 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$ ja keskiarvo $0,02 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$. Minimi- ja maksimi- arvot havaittiin samana päivänä (9.6.2015) soistuneen kasvupaikan kuusista. Myös oksat toimivat siis pieninä metaanin lähteinä, mutta ajoittain myös nieluina. Vuolla oli suurta vaihtelua positiivisen ja negatiivisen välillä ilman selkeää säännönmukaisuutta.

3.3.1 Puiden oksien metaanivoiden ajallinen ja kerrosten välinen vaihtelu

Oksien metaanivuossa ei ollut koko mittauskauden aikana selkeää nousevaa tai laskevaa trendiä (kuva 15). Soistuneen koealan koivujen (koepuut 1 ja 2) oksien vuot sijoittuivat väleille $-0,01-0,32 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$ ja kuusien (koepuut 3 ja 4) oksien vuo vaihteli välillä $-0,03-0,70 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$.

Kuivahkon kankaan koivun oksien vuo vaihteli mittausajanjaksolla välillä $-0,046-0,115 \mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$. Samaan tapaan kuin soistuneen alueen koivuissa, myös kuivahkon kankaan koivun oksien vuot olivat pääasiassa positiivisia. Poikkeuksellisesti verrattuna muihin mittauksiin, 6.5. tehdyissä mittauksissa havaittiin kaikkien mitattujen oksien toimivan metaanin nieluina. Äkillinen CH₄-päästöjen lasku toistui kauden viimeisissä mittauksissa (Kuva 15 E). Kummankaan koealan oksien CH₄-voiden kes-

kiarvoissa ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja mittausviikkojen välillä. Soistuneella koealalla latvuksen ylemmässä kerroksessa voidaan nähdä ajoittain suurempia CH₄-päästöjä kuin alemmassa kerroksessa (Kuva 15 A, B, D ja E).

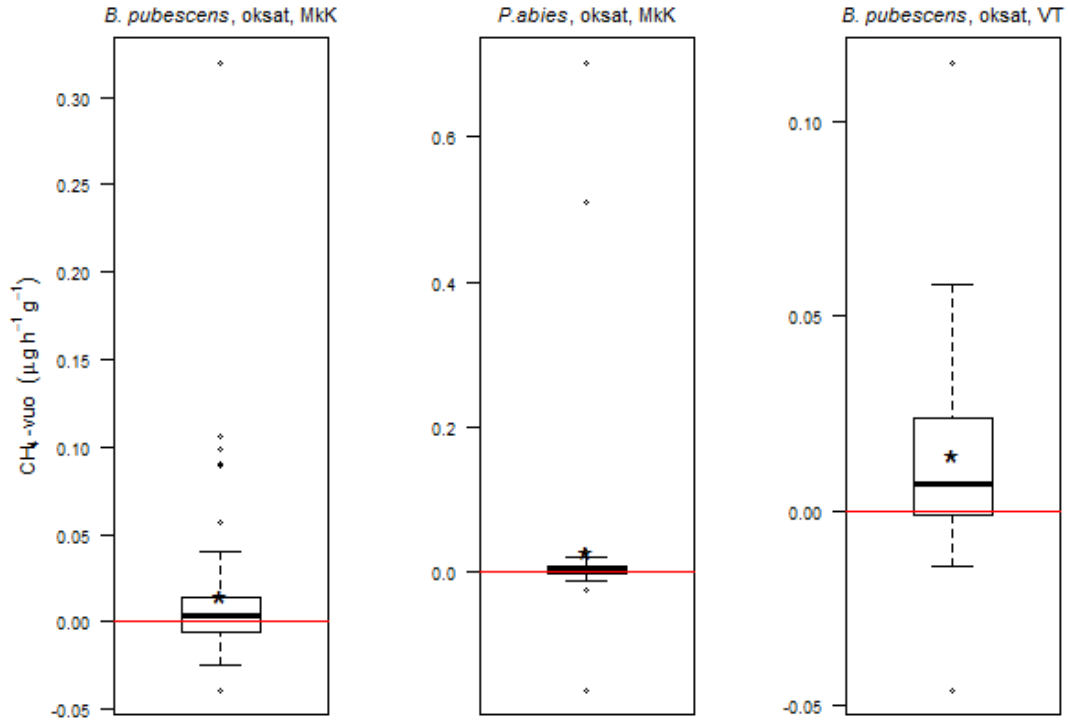


Kuva 15. Koivujen ja kuusien oksien CH₄-vuon ajallinen vaihtelu kuivahkolla kankaalla (VT) ja latvuston eri kerroksissa soistuneella koealalla (Mkk). Tunnus OA viittaa ylemmässä kerroksessa olleisiin oksiin, jotka olivat osittain alttiita suoralle säteilylle. Tunnus OB viittaa vastaavasti alemmalla tasolla olleisiin oksakammioihin, joihin suora säteily ei ulottunut. Kammiotunnukset on esitelty taulukossa 1.

3.3.2 Puiden oksien metaanivoiden vaihtelu puulajien ja kasvupaikkojen välillä

Soistuneella kasvupaikalla vuon vaihteluväli on suurempi kuusella kuin koivulla, vaikka kuusen vuoarvoista suurin osa on aivan nollan tuntumassa (Kuva 16). Kuusen oksien CH₄-voiden pääasiallinen sijoittuminen lähelle nollaa onkin kuvaavin ero oksien vuossa eri lajien välillä. Oksista vuosta ei havaittu tilastollisesti merkittäviä

eroja puulajien välillä. Kasvupaikkojen välisessä vertailussa oksien vuo on koivujen kesken hyvin samankaltaista, eikä tilastollisesti merkittävää eroavaisuutta havaittu.



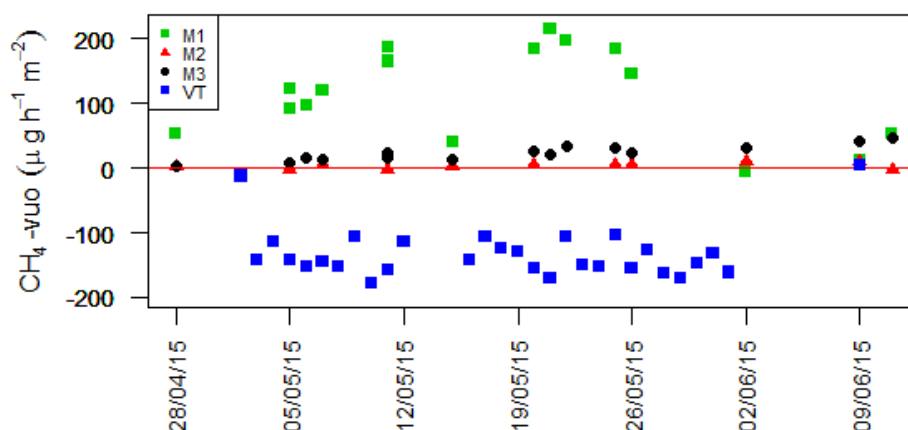
Kuva 16. Koepuiden oksien CH₄-vuot lajeittain eri kasvupaikoilla. Ruutu- ja janakaavioissa mediaani on merkitty korostetulla viivalla ja keskiarvo tähdellä. Laatikon reunat rajaavat 25 % ja 75 % persenttiilit ja viikset välin, johon 99 % kyseisestä kammioista havaituista voista sijoittuu.

3.4 Metsänpohjan metaanivuo

Soistuneella koealalla metsänpohjasta havaittiin enimmäkseen CH₄-päästöjä, kun taas kuivahkolla kankaalla metsänpohja toimi yksittäistä päivää lukuun ottamatta koko mittauskauden ajan voimakkaana nieluna. Pienin havaittu vuo soistuneella koealalla oli $-5,3 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ (2.6.2015) ja suurin $220 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ (21.5.2015), keskiarvon ollessa $52 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$. Vastaavasti kuivahkolla kankaalla pienin havaittu vuo oli $-180 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ (10.5.2015), suurin $5,0 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ (9.6.2015) ja keskiarvo $-130 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$.

3.4.1 Metsänpohjan metaanivuon ajallinen ja kasvupaikkojen välinen vaihtelu

Soistuneella alueella metsänpohjan CH₄-päästöt kasvoivat mittausjaksolla (Kuva 17). Sama nouseva trendi havaittiin kaikissa kammioissa, vaikka yksittäisissä mittauksissa esiintyikin metaanin sitoutumista (Kuva 17). Kuvassa 17 on kolmesta soistuneen alueen ja yhdestä kuivahkon kankaan maakammioista mitatut CH₄-vuot mittausajanjaksolla. Kuvasta nähdään, että soistuneella alueella metsänpohjan päästöt kasvavat mittauspisteiden välillä eri nopeuksilla kasvukauden edetessä. Metsänpohjan CH₄-voiden koealakohtaisessa tarkastelussa ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja mittausviikkojen välillä, vaikka yksittäisiä kammioita tarkastellessa onkin havaittavissa selkeää CH₄-päästöjen nousu kasvukauden edetessä (Kuva 17). Kuivahkon kankaan maan CH₄-vuo vaihteli tasaisesti -100:n ja -200:n $\mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ välillä, joskin yksittäisenä päivänä ilmeni metaanin vapautumistakin (Kuva 17). Kasvupaikkojen väliset metsänpohjan CH₄-vuot olivat merkitsevästi erilaiset ($p < 0,001$). Kasvupaikkojen väliseksi eroksi voidaan myös katsoa se, että soistuneella koealalla metsänpohjan CH₄-vuo oli lähes koko mittauskauden ajan kasvussa, mutta kuivahkolla kankaalla CH₄-vuossa ei ollut havaittavissa selkeää ajallista trendiä.



Kuva 17. Metsänpohjan CH₄-vuon ajallinen vaihtelu metsäkortekorvessa ja kuivahkolla kankaalla 28.4.–11.6.2015. M1, M2 ja M3 ovat metsäkortekorven ja VT kuivahkon kankaan mittauspisteitä.

3.5 Puiden metaanivuot metsikkötasolla

Taulukkoon 2 on laskettu koepuista mitatut CH₄-vuot koko puun tasolle yleistettynä. Soistuneella kasvupaikalla oksien ja runkojen vuo ei eroa merkittävästi koivujen välillä, kun taas kuusien välillä on suuri ero oksien CH₄-vuossa. Kuivahkolla kankaalla koivun runko osittain sitoi ja osittain päästi metaania, mutta keskiarvona vuo oli negatiivinen (sidontaa). Sen sijaan oksista havaituista pienistä CH₄-päästöistä tuli huomattavat, kun ne yleistettiin koko latvuksen oksabiomassalle (Taulukko 2). Näihin arvioihin perustuen kuivahkon kankaan koivusta emittoitui koko mittauskauden aikana eniten metaania.

Taulukko 2. Koepuista mitatut CH₄-vuot kokopuun tasolle yleistettynä. Yleistykset on laskettu kertomalla mittauskauden koepuukohtaisia runkojen vuokeskiarvoja rungon pinta-aloilla ja oksien vuokeskiarvoja puun oksien kuivapainoilla.

Koepuun nro. /				Runkojen CH ₄ -vuo	Oksien CH ₄ -vuo
Koeala	Puulaji	d1,3 (cm)	Pituus (m)	(μgh ⁻¹)	(μgh ⁻¹)
MkK	1 / <i>B. pubescens</i>	9,5	11,3	208	93,3
MkK	2 / <i>B. pubescens</i>	8,6	12,9	229	70,0
MkK	3 / <i>P. abies</i>	7,3	8,5	0,794	138
MkK	4 / <i>P. abies</i>	12,5	12,1	1,08	464
VT	5 / <i>B. pubescens</i>	19,5	19,5	-4,78	508

Puiden CH₄-vuot olivat vaihtelevia yksittäisten puiden välillä, ja puulajien ja kasvupaikkojen välillä. Erityisen suurta vaihtelu oli samalla kasvupaikalla olleiden kuusien välillä, joista havaitut CH₄-päästöt olivat myös pienempiä verrattuna koivuihin. Soistuneella koealalla mitatut koivujen CH₄-päästöt olivat toisaalta hyvin samanlaisia, mikä mahdollistaa luotettavamman vuoleistyksen tekemisen metsikkötasolle. Metsikkötasolle tehtävässä yleistämisessä puun pinta-alaa ei voida määrittää samalla tarkkuudella kuin koepuiden tapauksessa, sillä käytössä ei ole useamalta korkeudesta mitattuja ristiläpimittoja. Tämän takia laskennassa oli käytettävä tavallisen kartion kaavaa, joka antaa todellisuutta pienemmän kuoren pinta-alan ja siten aliarvioi todellista puiden vuota.

Taulukossa 3 on esitetty CH₄-vuon yleistäminen koealojen tyyppisille metsille, eli metsäkortekorvelle (MkK) ja kuivahkolle kankaalle (VT). Metsäkortekorven kohdalla hehtaarikohtainen runkoluku perustuu koealalla tehtyyn puuston inventointiin, mutta kuivahkon kankaan tapauksessa runkoluku on arvio esimerkinomaisesti kasvu-paikalla esiintyvien koivujen määrästä, sillä kyseinen koivu oli alueella ainoa lajinsa edustaja. Vaikka ekstrapoloitujen CH₄-voiden erot puun eri osissa ovatkin suuria, on oksien ja runkojen yhdistetty CH₄-päästöt lähes samankaltaisia puulajista riippumatta (Taulukko 3). Yhdistetty kasvupaikkakohtainen puiden ja metsänpohjan CH₄-vuo nähdään taulukosta 4. Metsäkortekorvessa puiden CH₄-päästöt ovat lähes samalla verrattuna metsänpohjaan.

Taulukko 3. Metsikkötasolle hehtaarikohtaiseksi ja vuorokausittaiseksi tehty CH₄-vuon puulajeittainen yleistäminen.

Metsä- / suotyyppi	Puulaji	Keskilä- pimitta (cm)	Keski- tuus (m)	Runkoa / ha	Rungon CH ₄ - vuo (g ha ⁻¹ vrk ⁻¹)	Oksien CH ₄ - vuo (g ha ⁻¹ vrk ⁻¹)	Puiden CH ₄ - vuo (g ha ⁻¹ vrk ⁻¹)
MkK	<i>B. pubescens</i>	5,3	7,6	2400	4,50	1,32	5,83
MkK	<i>P. abies</i>	6,8	6,4	1900	0,019	6,13	6,15
VT	<i>B. pubescens</i>	19,5	19,5	200	-0,023	2,44	2,42

Taulukko 4. Metsikkötasolle hehtaarikohtaiseksi ja vuorokausittaiseksi tehty CH₄-vuon yleistäminen.

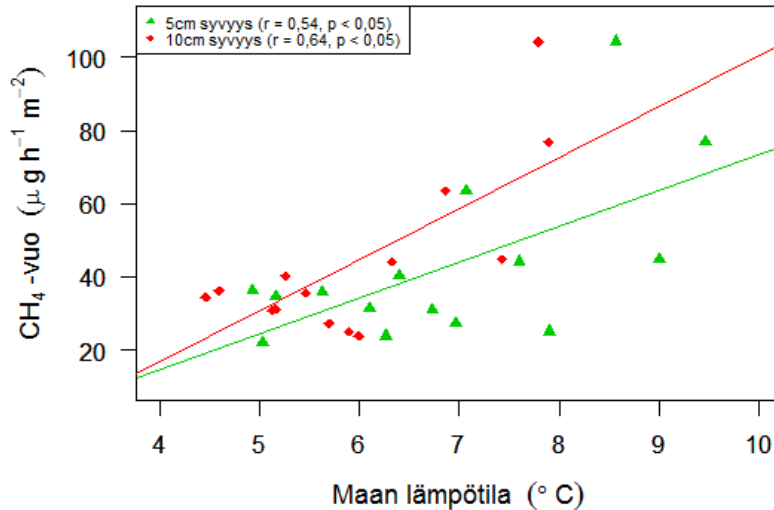
Koeala	Puiden CH ₄ -vuo (g ha ⁻¹ vrk ⁻¹)	Metsänpohjan CH ₄ -vuo (g ha ⁻¹ vrk ⁻¹)
MkK	12,0	12,5
VT	2,42	-31,6

3.6 Ympäristötekijät

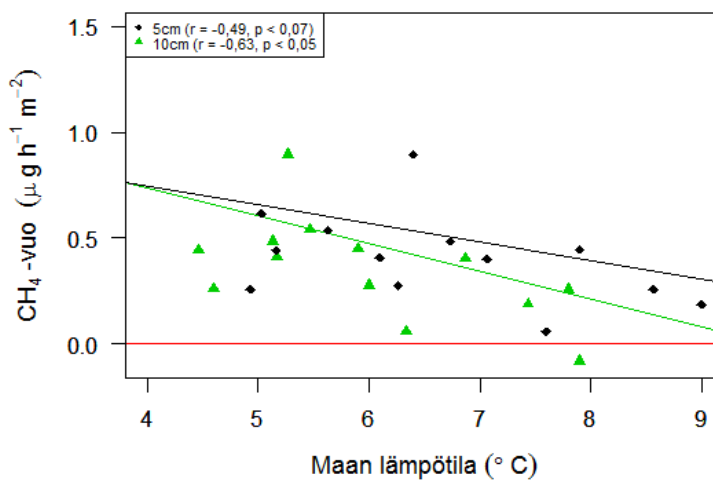
3.6.1 Maan lämpötilojen ja metaanivuon välinen korrelaatio

Soistuneella koealalla 5 cm ja 10 cm syvyyksistä mitattujen maan lämpötilojen ja koepuiden rungoista mitattujen CH₄-voiden välillä havaittiin tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita (Kuva 18, 19). Koivujen runkojen keskiarvoinen vuo korreloi positiivisesti 5 cm syvyydestä mitattujen lämpötilojen kanssa ($r_s = 0,54$, $p = 0,037$),

mutta korrelaatio oli voimakkaampaa 10 cm maalämpöjen kanssa ($r_s = 0,64$, $p = 0,010$). Kuvasta 18 on havaittavissa, että CH_4 -vuon suuruuden vaihteluväli kasvaa lämpötilan kasvaessa. Kuusien kohdalla korrelaatiot vuon ja maalämpötilojen välillä olivat negatiivisia, ja korrelaatio 10 cm maalämpötilojen kanssa oli voimakkaampaa ($r_s = -0,63$, $p = 0,012$) verrattuna lähempänä pintaa mitattuihin lämpötiloihin, joiden kanssa korrelaatio ei enää ollut tilastollisesti merkitsevä ($r_s = -0,49$, $p = 0,066$).



Kuva 18. Kuvassa on koivujen runkojen keskiarvoisen CH_4 -vuon ja maalämpötilojen välinen korrelaatio soistuneella koelalla. Lämpötilat on mitattu 5 cm ja 10 cm syvyydellä maan pinnasta. Vuokeskiarvot edustaa samassa mittauksessa tehtyjen havaintojen keskiarvoa. Metaanivuo korreloi positiivisesti ja tilastollisesti merkitsevästi molemmilta maan syvyyksiltä mitattujen lämpötilojen kanssa.



Kuva 19. Kuvassa on kuusien keskiarvoisen CH_4 -vuon ja maalämpötilojen välinen korrelaatio. Lämpötilat on mitattu 5 cm ja 10 cm syvyydellä maan pinnasta. Metaanivuo korreloi negatiivisesti molempien maalämpötilojen kanssa, mutta vaikutus on tilastollisesti merkitsevä ainoastaan 10 cm syvyydestä mitattujen lämpötilojen kanssa.

Maan CH₄-vuo korreloi positiivisesti maalämpötilojen kanssa yhden maakammion kohdalla (kammio M3, $r_s < 0,85$, $p < 0,001$). Kammiot yhdistävässä tarkastelussa ei havaittu merkitseviä korrelaatioita.

3.6.2 Sadannan ja metaanivuon välinen korrelaatio

Sadannan vaikutusta CH₄-vuohon testattiin 5 ja 10 vuorokauden sadekertymien ja vuon välistä korrelaatiota tarkastelemalla. 5 vuorokauden sadesummalla ei ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota koepuiden CH₄-vuon kanssa ($r_s > 0,05$), mutta 10 vuorokauden sadekertymä taas osoitti negatiivista korrelaatiota soistuneen koealan koivujen runkojen keskiarvoisen CH₄-vuon kanssa ($r_s = -0,69$, $p = 0,003$). Soistuneen koealan koepuiden CH₄-vuon oksien ei havaittu korreloivan sadekertymän kanssa. Metsänpohjan kolmen kammion CH₄-vuon keskiarvo soistuneella koealalla ei korreloinut merkitsevästi sateiden kanssa.

3.6.3 Muiden taustamuuttujien ja metaanivuon välinen korrelaatio

Muita testattuja taustamuuttujia olivat PAR- ja UV-säteily. Mahdollisia korrelaatioita etsittiin erilaisilla kammioyhdistelmillä: esimerkiksi samaa lajia ja samalla kasvupaidalla olevien puiden oksien vuoarvot yhdistettiin, mutta tarkastelua tehtiin myös kammioittain. Eri säteilyjen ja CH₄-vuon välillä ei voitu havaita korrelaatiota eri kammioyhdistelmillä taikka yksittäisten kammioiden tarkastelussa. Vaikka CH₄-vuossa ei ollutkaan tilastollisesti merkittäviä eroja yö- ja päivämittausten välillä, vuorokauden aikaisia eroja ilmeni kuitenkin erityisesti säteilyjen määrässä. Tämän takia voiden ja säteilyjen välistä yhteyttä testattiin myös valitsemalla ainoastaan päivällä tehdyt mittaukset. Tällöinkään ei kuitenkaan ilmennyt merkitseviä korrelaatioita.

Korrelaatiota CH₄-vuohon etsittiin myös ilman lämpötilasta (SMEAR II, 4,2m), mahlanvirtausnopeudesta, ekosysteemitasolla tapahtuvasta hiilen sidonnasta, latvuston yläpuolisesta CH₄-vuosta sekä haihdunnasta. Kuten edellä, näidenkin tapauksessa testattiin erikseen päivällä tehdyt mittaukset. Ainoastaan kuivahkolla kankaalla kasvaneesta koivusta huomattiin, että kolmannesta kerroksesta havaittu CH₄-vuo korreloi merkitsevästi ja positiivisesti ilman lämpötilan kanssa ($r_s = 0,95$, $p = 0,005$).

Muutoin vuo ei kuitenkaan korreloinut edellä mainittujen taustamuuttujien kanssa merkitsevästi.

4. Tulosten tarkastelu

4.1 Puiden runkojen metaanivuo ja vuota säätelevät tekijät

Metaanipäästöjen voimakkuuden kannalta poikkeavimmat ja merkittävimmät havainnot olivat soistuneen alueen hieskoivujen alimmista rungon osista havaitut CH₄-päästöt (Kuva 11 A). Havaintojen perusteella boreaalisen kasvillisuusvyöhykkeen turve- mailla kasvavat puut voivat päästää rungoistaan huomattavia määriä metaania, päästöjen yhä kasvaessa kasvukauden edetessä. Puiden rungoista havaittu metaanipäästöjen keväinen kasvu on yhtenevä myös muiden tutkimusten tuloksiin: Pangalan ym. (2015) läpi vuoden kestäneessä puiden CH₄-päästöjen seurannassa hieskoivujen runkojen CH₄-päästöt kohosivat keväällä ja olivat korkeimmillaan touko-syyskuu välisenä aikana ($216 \pm 22 \mu\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$).

Kasvukaudenaikaista vaihtelua runkojen CH₄-päästöissä havaitsivat myös Terazawa ym. (2015), joiden mukaan ajallinen vaihtelu voi liittyä pohjaveden pinnan korkeuteen ja sen vaihteluun maassa. Tutkimuksessamme ei kiinnitetty huomiota vedenpinnan korkeuden ajalliseen vaihteluun maassa, mutta 10 päivän sadekertymän huomattiin korreloivan negatiivisesti koivujen runkojen CH₄-vuon kanssa soistuneella alueella ($r_s = -0,69$, $p = 0,003$). Soistunut koeala oli maastonmuodoiltaan painanteessa, jonne kertyvä sadevesi saattaa säädellä maan vedenpinnan korkeutta koealalla. Toisaalta sadevedellä havaittiin myös negatiivinen korrelaatio myös maalämpötiloihin ($r_s = -0,46$, $p < 0,036$), mikä on puoltaa sateisuuden vaikutusta vuota vähentävänä tekijänä laskemalla maan lämpötilaa. Maan lämpötilojenhan havaittiin korreloivan positiivisesti soistuneen alueen hieskoivujen CH₄-vuon kanssa ($r_s = 0,64$, $p < 0,05$). Erityistä tulvimista koealalla ei myöskään sateisten päivien aikoihin ollut havaittavissa. Terazawa ym. (2015) tulosten mukaan puiden runkojen CH₄-päästöt olivat positiivisesti riippuvaisia maan vedenpinnan korkeudesta, mikä on havaintona jokseenkin vastakohtainen tässä työssä havaittuun negatiiviseen korrelaatioon sadekertymän

ja päästöjen välillä, jos sadekertymän ajatellaan nostavan vedenpinnan korkeutta. Myös kuivahkolla kankaalla CH₄-vuon negatiivinen korrelaatio maankosteuden kanssa poikkeaa Terazawan ym. (2015) havainnosta, vaikkakin soistuneella alueella mitattu maankosteus oli lähes aina 100 %. Sadekertymän ja maan kosteuden ei toisaalta voida yksiselitteisesti olettaa olevan yhteydessä CH₄-vuohon vedenpinnan korkeutta säätelevänä tekijänä. Kumulatiivinen sadanta ja kuivahkolta kankaalta mitattu maankosteus korreloivat negatiivisesti maan lämpötilojen kanssa ($r_s = -0,46$, $p = 0,04$; $r_s < -0,87$, $p < 0,001$), mikä voi jälleen viitata siihen, että sadanta ja maankosteus vaikuttavat vuohon välillisesti maanlämpötilaa alentavina tekijöinä.

Lehtipuiden kohdalla samankaltainen positiivinen korrelaatio maalämpötilojen kasvun ja runkojen CH₄-vuon välillä on niin ikään todettu useissa aikaisemmissa tutkimuksissa (Pangala ym. 2014, Pangala ym. 2015, Terazawa ym. 2015). Ilmiö on tavallisesti liitetty lämpötilan nousun myötä maassa lisääntyvään metanogeneesiin, jolloin maan hapettomissa olosuhteissa syntynyt CH₄ kulkeutuisi puun rungossa aerennyymisolukon tai transpiraation välityksellä ylöspäin vapautuen rungossa olevien korkkihuokosten kautta ilmakehään, kuten Pangala ym. (2014) esittää. Kuusien tai muidenkaan havupuiden runkojen CH₄-vuon ja maalämpötilojen välistä yhteyttä ei ole tähän mennessä tutkittu, mutta tässä työssä havaittu negatiivinen korrelaatio kuusien runkojen ja maalämpötilojen välillä (10 cm syvyys, $r_s = -0,63$, $p < 0,05$) oli ilmiönä täysin päinvastainen koivuihin verrattuna. Se, että maanlämpötiloilla oli vastakkainen vaikutus hieskoivuihin ja kuusiin, nostaa esiin mahdollisuuden, että eri puulajien vapauttamalla metaanilla olisi eri alkuperä, tai että lajeilla on erilaiset fysiologiset vasteet maan lämpötilaan ympäristön muuttujana. Puulajien välisistä fysiologisista eroista tai esimerkiksi lajikohtaisesta transpiraation vasteesta maan lämpötilan muutoksiin on kuitenkin heikosti tutkimustietoa tarjolla.

Soistuneella koealalla ylempänä rungoissa havaittu vuo oli hieskoivuillakin pienempää, eikä merkitsevästi eronnut kuusien rungon vuon kanssa ($p > 0,05$). Koivujen runkojen päästöt vaikuttivat kuitenkin olevan keskimmaisessä mittauserroksessa kuvien 11 ja 13 perusteella suurempaa kuin samojen puiden ylimmässä kerroksessa, mikä havaintona luo yhtenevyyttä aikaisempiin tutkimuksiin (esim. Pangala ym. 2015), joissa CH₄-päästöjen on havaittu vähenevän puun pituusprofiilissa. Pangala ym. (2015) osoittivat hieskoivujen ja tervaleppien CH₄-vuota tutkiessaan, että runkojen CH₄-päästöissä voi olla suurta vaihtelua myös saman kasvillisuusvyöhykkeen eri

lehtipuiden välillä. Kuusien erilainen CH₄-vuon dynamiikka korkeuden suhteen ja pienet päästöt alimmissakin rungon osissa voi viitata jälleen mahdollisiin eroihin metanin alkuperässä tai puiden fysiologiassa.

Havupuiden CH₄-päästöihin liittyvä tutkimusta on yleisesti huomattavasti niukemmin tarjolla verrattuna lehtipuihin, mikä johtunee osaltaan boreaaliselle vyöhykkeelle suuntautuneiden tutkimusten vähyydestä. Sen myötä myös havupuiden CH₄-vuohon vaikuttavat tekijät tunnetaan huonommin. Koska koivujen ja kuusien CH₄-vuon yhteys maan lämpötilaan oli niin erilainen, tärkeä tieto olisi, onko muissa tutkimuksissa havaittu havupuiden runkojen vuon yhteyttä maalämpötiloihin. Machacova ym. (2016) tutkimuksissa männyn runkojen vuon ei havaittu olevan yhteydessä maalämpötiloihin, mutta toisaalta mittaukset ajoittuivat keskikesälle, jolloin maalämpötilojen vaihtelu ei ole kovin suurta. Jos sadannan oletetaan keväällä vaikuttavan CH₄-vuohon negatiivisesti maanlämpötiloja säätelemällä, avoimeksi kysymykseksi jää, miksi sadannan vaikutus ei näkynyt myös kuusien runkojen CH₄-vuossa negatiivisena korrelaationa sadekertymän kanssa.

Kivennäismaalla kasvaneen hieskoivun rungon CH₄-vuon dynamiikka oli poikkeuksellinen verrattuna soistuneen kasvupaikan koivuihin. Korkeuden suhteen puun vuo noudatti päinvastaista dynamiikkaa (CH₄-päästöjä ylempänä rungossa, sitoutumista alempana) kuin soistuneella kasvupaikalla. Vuo rungon alemmissa kerroksissa vaikuttaa satunnaiselta, kun taas rungon ylimmässä kerroksessa havaittu vuo selvästi kasvaa kasvukauden edetessä (Kuva 12). Koska mittauksia ei tehty rungon yläosista, tutkimus ei anna vastausta siihen, olisivatko päästöt ylempänä vielä suurempia ja korreloisivatko ne positiivisesti ilman lämpötilan kanssa. Vaikka kerrosten välisessä vuossa ei havaittukaan tilastollisesti merkitseviä eroja, myös kivennäismailla kasvavien puiden CH₄-vuon lisätutkimus olisi tarpeen. Kuivahkolta kankaalta kerätyn aineiston määrä jäi metsäkortekorpea vähemmäksi, mikä vaikeuttaa osaltaan laajempien johtopäätösten tekemistä.

4.2 Latvuston metaanivuot ja niitä säätelevät tekijät

Oksien CH₄-vuo oli pääasiassa hyvin pientä, ja vastoin aikaisempia tutkimuksia (Sundqvist ym. 2012, Machacova ym. 2016), mikään tutkituista ympäristönmuutuksista, mukaan lukien oksabiomassan kehitys, ei korreloinut vuon kanssa positiivisesti tai negatiivisesti. Oksista havaitut vuot olivat myös hyvin samankaltaisia puulajien ja kasvupaikkojen välillä. Oksien CH₄-vuohon on saattanut vaikuttaa käytetty mittaus-tekniikka (ks. kappale 4.6). On myös mahdollista, että samankaltainen CH₄-vuo puulajien ja kasvupaikkojen välillä johtuu puiden lehdissä tai oksissa tapahtuvasta samankaltaisesta abioottisista tai bioottisista metaanintuotto-prosessista. Lehdissä tapahtuvaa bioottista CH₄-tuottoa, esimerkiksi metanogeneesin tuloksena, ei ole toistaiseksi osoitettu. Sen sijaan aerobisissa oloissa puiden lehdissä on osoitettu tapahtuvan CH₄-tuottoa tai sitoutumista abioottisten tekijöiden ajamana. Yksi näistä tekijöistä on UV-säteily (McLeod ym. 2008, Keppler ym. 2008, Bloom ym. 2010), joka voi vaikuttaa lehtiin aktivoimalla happiradikaaleja, jotka taas hajottavat soluseinien pektiiniä, lopputuloksena metaaninvapautuminen lehdistä (Apel ja Hirt 2004). Kuvasta 15 voi nähdä, kuinka oksien CH₄-päästöt ovat yksittäisissä mittauksissa hieman korkeampia latvuston ylätasolla, kun varjoisammassa olleiden oksien päästöt pysyttelevät lähempänä nollaa. Eräs mahdollisuus on, että yksittäiset korkeammat päästöt johtuvat ylempien kammioiden saamasta suuremmasta säteilyn määrästä. UV-säteilyn ei kuitenkaan tässä työssä havaittu olevan merkitsevästi yhteydessä oksien CH₄-vuohon, eikä säteily ole välttämättä ainoa fysiologisen stressiin lähde oksakammioissa (ks. kappale 4.4).

Oksien rooli metsien CH₄-vuossa vaatii lisätutkimusta, sillä latvuston korkeudella tapahtuvat *in situ* -tutkimukset ovat jääneet vähemmälle. Oksien osuus metsän CH₄-vuossa voi olla jopa merkittävämpi kuin runkojen johtuen oksien suuresta biomassasta. Tässä tutkimuksessa korostui, ettei puiden oksien CH₄-vuota voida jättää huomiotta ainakaan yksittäisestä oksasta havaittuun vähäiseen vuohon perustuen, vaan niiden osuus tulee selvittää tarkemmin niiden ollessa mahdollisesti joko metaaninsitojia tai suurempia metaaninvapauttajia kuin puiden rungot (ks. s. 41, Taulukko 2).

4.3 Metsänpohjan metaanivuot ja niitä säätelevät tekijät

Soistunut alue oli toimi CH_4 -lähteenä, mikä oli odotettavissa monien aikaisempien tutkimusten perusteella (ks. esim. Conrad 2009). Soistuneen koealan mittauspisteiden välillä huomattiin kuitenkin suuria eroja CH_4 -päästöjen voimakkuudessa ja dynamiikassa (Kuva 17), vaikka kammiot olivat vain lyhyen matkan päässä toisistaan. Erot voivat kuitenkin johtua siitä, että kussakin mittauspisteessä ei ollut välttämättä identtiset olosuhteet kasvillisuuden sekä vedenpinnan korkeuden ja sen vaihtelun suhteen, vaikka mittauspisteet sijaitsivatkin lähellä toisiaan. Kuivahko kangas toimi CH_4 -nieluna, mikä vastaa myös hyvin aiempia tutkimuksia kivennäismaihin liittyen (ks. Conrad 2009).

Soistuneella koealalla olleiden mittauspisteiden CH_4 -vuon keskiarvojen ei havaittu korreloivan merkitsevästi minkään testatun taustamuuttujan kanssa. Tämän selittää ainakin osittain se, että kammioiden väliset erot vuossa olivat niin suuria, ja yksittäisestä kammioista havaittiinkin positiivinen korrelaatio CH_4 -vuon ja maalämpötilan välillä. Toisaalta, tämän ollessa ainoa löytynyt yhteys metsänpohjan CH_4 -vuon ja taustamuuttujien välillä, on metsänpohjan CH_4 -vuosta vaikeaa vetää laajempia johtopäätöksiä. Koska maakammioiden CH_4 -vuot poikkesivat niin paljon toisistaan, vaikuttaa näihin voihin luultavimmin jokin taustamuuttuja, jota tässä työssä ei huomioitu (esim. maan vedenpinnan korkeus).

4.4 Puiden merkitys metsikkötason metaanitaseeseen

Metsikkötasolle tehty puiden CH_4 -vuon yleistys antoi yllättäviä tuloksia. Yleistyksen perusteella hieskoivujen rungoista CH_4 -päästöt ovat yli kaksinkertaiset verrattuna oksistoon, kun taas kuusilla oksisto vaikuttaisi olevan varsinainen päästöjen lähde (Taulukot 2 & 3). Kuten kuusilla, myös kuivahkon kankaan koivun oksistosta havaittiin yleistyksen myötä suuria CH_4 -päästöjä. Vaikka koivujen alimmista rungonosista havaittiin selvästi suurempia päästöjä kuin kuusen rungoista, kuusien puutasolla tapahtuvat CH_4 -päästöt ylittävät kuitenkin koivujen päästöt. Selityksenä tälle on oksista havaitut päästöt: vaikka soistuneella koealalla koivujen oksien CH_4 -päästöt ei merkit-

sevästi eronnutkaan kuusien oksista, on kuusien oksissa huomattavasti enemmän biomassaa kuin koivujen oksissa. Tässä havainnossa korostuu se, että vaikka oksien CH₄-päästöt vaikuttivatkin pieniltä, tulee muistaa että oksien CH₄-vuon laskenta on suoritettu oksan kuivapainogrammaa kohden.

Koealojen hehtaarikohtaiset vuon yleistykset koskevat ainoastaan koealojen kaltaisia elinympäristöjä, eikä niiden perusteella ole mielekäästä tehdä muita metsä- ja suotyyppisiä koskevia yleistyksiä. Tämä johtuu muun muassa siitä, että puiden CH₄-vuon vaikuttavia tekijöitä ei tunneta tarpeeksi hyvin. On esimerkiksi mahdollista, että puiden CH₄-vuo on erilaista eri puustotiheyden omaavissa metsissä tai että maasto muodot vaikuttavat CH₄-vuon ajalliseen vaihteluun. On myös huomioitava, että kuivahkon kankaan koeala on metsätyypiltään mäntyvaltaista metsää, missä koivuja esiintyi vain harvakseltaan yksittäin. Tämä aiheuttaa epävarmuutta metsikkötason CH₄-vuon yleistykseen kuivahkolla kankaalla.

Eräs mielenkiintoinen havainto tässä työssä on, että metsäkortekorven hieskoivujen rungoille tehty hehtaarikohtainen ekstrapolointi ($4,5 \text{ g h}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$) antaa hyvin samankaltaisen tuloksen kuin Pangalan ym. (2015) tutkimuksissaan tekemä ekstrapolaatio saman puulajin rungoille ($3,53 \pm 0,17 \text{ g h}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$). Myös Pangalan ym. (2015) tutkimus tehtiin turvemaalla kasvavilla puilla ja se on ensimmäinen tutkimus, joka antaa lajikohtaisen yleistyksen puiden runkojen CH₄-päästöille. Pangala ym. (2015) eivät julkaisussaan raportoineet puuston tiheyttä tai muuta puuston määrää kuvaavaa muuttujaa, mikä olisi toisaalta olennaista tulosten vertailun kannalta.

Myös vuorokausittaiselle ja hehtaarikohtaiselle tasolle tehdystä metsänpohjan CH₄-vuon yleistämisestä nähdään, että soistuneen koealan yleistys on melko samalla tasolla kuin Pangalan ym. (2015) tutkimuksessa, jossa mitattiin myös maan CH₄-vuota sekä mättäiltä että suon painanteista: heidän havaintojensa mukaan painanteista vapautuvan metaanin määrä on $10,9 \pm 3,01 \text{ g d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, kun tässä tutkimuksessa havaittu arvo oli $12,5 \text{ g d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Heidän tulosten perusteella koivujen rungoista vapautuvan metaanin osuus maan CH₄-päästöistä on siis n. 32 %, kun tässä työssä havaittu vastaava luku on n. 35 %. Tulosten samankaltaisuus on yllättävää ja sen voi katsoa toimivan jonkinasteisena, joskin lisäviitteiden puuttuessa heikkona vahvistuksena tässä työssä tehdyille havainnoille.

Metsäkortekorvessa koivut ja kuuset vaikuttavat vapauttavan yhdessä lähes saman verran metaania kuin metsänpohjakin (Taulukko 4). Kuivahkon kankaan metsänpohja toisaalta vaikuttaisi sitovan enemmän metaania, kuin kaksi edellä mainittua lähdeä vapauttavat.

4.5 Virhelähteet

4.5.1 Kammiomittausten virhelähteet

Virhelähteitä on mittausten aikana pyritty rajoittamaan huolellisella työskentelyllä ja mittauksiin liittyvien muistiinpanojen ja olosuhteissa tapahtuneiden muutosten kirjaamisella ja huomioinnilla. Esimerkki tällaisesta toimenpiteestä on näytteenottojen yhteydessä tehdyt muistiinpanot, joihin on kirjattu havaintoja mittausten aikana tapahtuvista sään muutoksista sekä kammioiden ja näytteenottovälineistön toiminnasta. Kokeelliselle tutkimukselle ominaisesti, mahdollisia virhelähteitä on kuitenkin olemassa tiukastikin kontrolloiduissa olosuhteissa. Tavallisimpia näytteenottomenetelmään liittyviä virhelähteitä ovat esimerkiksi vuotava tai huonosti vakumoitu näyteputki, viallinen ruisku näytteenotossa, tai mittauskammion vuotaminen. Kaikki nämä ovat mittausten aikana kuitenkin todennäköisesti havaittavissa ja siten huomioitavissa näytteiden jatkokäsittelyssä.

Puiden CH₄-vuonmittauksen yksittäinen mittausaika kesti 5 tuntia, minkä aikana säteilyn määrä ja lämpötila voivat olla vaihdella huomattavasti. Tässä mielessä runko- ja oksakammiot olivat eri asemassa, koska runkokammiot sijoittuivat puiden varjossa oleviin osiin, eikä auringon säteilyllä tai sen lämmittävällä vaikutuksella siten ollut niiden kannalta merkittävää vaikutusta. Oksakammioiden kohdalla tilanne oli toinen: ylimmät oksakammiot olivat alttiita suoralle auringon säteilylle, mikä aiheutti oksakammioissa kasihuoneilmion tapaista lämpenemistä ja suhteellisen kosteuden kasvua. Lisäksi kammioiden sisällä oleva yhteyttävä lehtimateriaali kuluttaa nopeasti kammionsisäisen hiilidioksidin, minkä jälkeen yhteyttäminen hidastuu tai lakkaa kokonaan (Taiz ja Zeiger 2010). Tämä saattaa haitata myös PAR-säteilyn vaikutusten havaitsemista kasvin kaasun vaihdossa. Nämä suljetuista kammioista aiheutuvat ominaisuudet saattavat olla kammionsisäiselle kasvinosalle abioottisia stressitekijöitä,

jotka voivat vaikuttaa kasvin fysiologisten vasteiden kautta niistä vapautuvan metaanin määrään, joko positiivisesti tai negatiivisesti. Metaanin vapautumista lisäävä mekanismi johtuu kasvien lehdissä syntyvistä happiradikaaleista abioottisen stressin alaisena (Apel ja Hirt 2004), jotka hajottamalla lehtisoluisissa olevaa pektiiniä aiheuttavat metaanin tuottoa (McLeod ym. 2008, Messenger ym. 2009). Koska ei ole varmuutta siitä mistä oksien CH_4 tarkalleen on peräisin, voi olla että hiilidioksidin loppuminen ja lämpötilan nousu vaikuttaa CH_4 -päästöjä rajoittavalla tavalla esimerkiksi lehtien huulisolujen sulkeutuessa.

Virheelliset näytteet on havaittavissa näytteiden kaasukonsentraatioiden prosessointi vaiheessa. Virheellisiä havaintoja on työssä karsittu myös vuolaskujen yhteydessä käyttäen lineaarista robust fit -mallia sekä poistamalla huonolaatuista aineistoa laskettujen voiden NRMSE -arvoihin perustuen (ks. luku 2.5.2). Nämä toimenpiteet ehkäisivät virheellisten havaintojen joutumista lopullisten voiden tarkasteluun.

4.5.2 Vuon laskennan ja yleistämisen virhelähteet

Metaanivuon laskennassa eräs suoraan vuoarvoon vaikuttava virhelähde on kammioiden tilavuuden arviointi. Rasiamaisten runkokammioiden tilavuuden arviointi oli verrattain helppoa, mutta puun ympärille kootut sylinterimäiset kammiot ja oksakammiot olivat pinnoiltaan kalvomaisia, mikä mahdollisti pienet muutokset kammioiden tilavuudessa. Yksi kammioiden tilavuuteen mahdollisesti vaikuttava tekijä onkin näytteenottotekniikasta johtuva ilmanpaineen muutos kammiossa. Tosin on mahdollista, että hetkellinen kammionsisäinen alipaine korvautuu puusta kammioon imeytyvillä kaasuilla, eikä kelmulla päällystetyn kammion tilavuus ehdi paineenmuutoksen seurauksena muuttua. Sylinterimäisten kammioiden ja oksakammioiden tilavuus on kuitenkin huomattavasti vaikeampaa arvioida kuin rasiamaisten runkokammioiden. Oksakammioiden kohdalla tilavuus vaihtelee myös kammion sisälle kehittyvän oksabiomassan takia.

Puiden pinta-alan tarkka määrittäminen runkojen CH_4 -vuon ekstrapoloinnissa on eräs mahdollinen virhelähde. Koepuukohtaista runkojen vuota arvioitaessa pinta-alan määrittäminen voidaan tehdä vielä kohtalaisella tarkkuudella käytössä olevien usealta puun korkeudelta mitattujen ristiläpimittojen ansiosta. Hehtaaritasolle viedyt

yleistyksen sisältävät suuremman mahdollisuuden pinta-alan virhearvioinnille, koska käytössä on vain rinnankorkeudelta mitattu puulajikohtainen keskiläpimitta ja keskipituus. Tavallisen kartion kaavalla laskettu puiden pinta-ala saattaa johtaa aliarvioihin hehtaariohjeisessa CH₄-vuon määrittelyssä, sillä tavallinen kartio aliarvioi puun todellista tilavuutta ja kuoren pinta-alaa. Oksille tehty vuon yleistäminen tapahtui taas suoraviivaisesti käytössä olevia oksien biomassamalleja hyödyntämällä (Marklund 1988). Biomassamallit ovat olleet käyttökelpoisia kivennäismailla kasvavien metsien biomassojen arviointiin, mutta niiden paikkansapitävyyttä turvemaiden olosuhteissa ei ole tutkittu. Boreaalisen kasvillisuusvyöhykkeen turvemaille erikoistuneita puuston biomassamalleja ei ole toistaiseksi kehitetty.

4.5.3 Muita virhelähteitä

Lisäksi kammioista havaitut pienet CH₄-vuot saattavat olla virhelähteitä, sillä kaasukromatografian kyky havaita pienimmät pitoisuusmuutokset on rajoittunut. CH₄-vuon mittauksissa on käsitelty myös ainoastaan pientä osaa metsästä, eikä puiden CH₄-vuon alueellista vaihtelua voitu huomioda sen tarkemmin. Spatiaalista vaihtelua ilmenee luultavasti myös oksiston vuossa, koska esimerkiksi lehtien CH₄-vuota sääteleväksi tekijäksi on havaittu UV-säteily (Bloom ym. 2010). Tätä vaihtelua ei kunnolla voitu ottaa huomioon tässä tutkimuksessa. Puiden CH₄-vuossa voi tapahtua myös päivittäin suuria muutoksia, minkä takia myös mittausten ajallinen kattavuus voisi olla suurempi.

5. Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen perusteella puut toimivat metaanin lähteinä kasvukauden alussa. Puiden CH₄-päästöissä voi runkojen osalta olla selvää ajallista vaihtelua, mikä on kuitenkin puulajista ja kasvupaikasta riippuvaista. Turvemaalla kasvavien puiden runkojen CH₄-päästöt vaikuttavat myös olevan yhteydessä maan lämpötilaan, jonka

havaittiin korreloivan runkojen CH₄-päästöjen kanssa puulajista riippuen joko positiivisesti (hieskoivu) tai negatiivisesti (kuusi). Puiden latvuksella voi puu- ja hehtaarikohtaisen ekstrapolaation perusteella olla suurempi merkitys metaanin vapauttajana kuin puiden rungoilla. Turvemailla puuston yhdistetyt ja metsikkötasolle yleistetyt CH₄-päästöt ovat verrattavissa ja samaa suuruusluokkaa metsänpohjan CH₄-päästöjen kanssa. Kaikkinensa työn tulokset vahvistavat aiempien tutkimusten havainnot puiden CH₄-päästöistä ja osoittavat, että myös boreaalisen kasvillisuusvyöhykkeen puilla on potentiaalisesti merkitystä globaalissa CH₄-budjetissa, jossa puiden vapauttaman metaanin osuutta ei ole tähän asti lainkaan huomioitu.

Puun metaaninkuljetuksen mekanismeista ei tämän työn perusteella saatu tarkempaa tietoa, eikä runkojen vuota pystytty selittämään puun haihdunnalla johtuen puuttuvasta yhteydestä vuon ja mahlanvirtauksen välillä. Tärkeää olisikin tunnistaa metaaninkuljetuksen yhteys puun fysiologisiin ominaisuuksiin ja näiden yhteyksien ero puulajien ja kasvupaikkojen välillä. Kytkösten ymmärtäminen on avainasemassa puiden CH₄-vuohon vaikuttavien tekijöiden tunnistamisessa. Perusteellinen vuohon vaikuttavien tekijöiden tunteminen helpottaa myös puiden luotettavampien yleistämisten tekemistä ja mahdollistaa myös kausittaisen vaihtelun huomioimisen. Tämä työ tarjoaa esimerkin siitä, kuinka erilainen puiden CH₄-vuo voi olla puun eri osien, puulajien ja kasvupaikkojen välillä: kasvillisuusvyöhykkeen tai globaalien ympäristön kattava CH₄-vuon yleistämiseen voi liittyä suurta epävarmuutta, jos se tehdään pelkkään yksittäisiin puun osiin, puulajeihin tai kasvupaikkoihin perustuen. Boreaalilla kasvillisuusvyöhykkeellä hieskoivu ja kuusi ovat hyvin tavallisia puulajeja, samoin kuin ovat suo ja kivennäismaa kasvupaikkoina. Metaanivuon suuri vaihtelu tässä työssä testattujen lajien ja kasvupaikkojen välillä viittaa siten myös suureen vaihteluun koko boreaalisen kasvillisuusvyöhykkeen sisäisesti.

Minkkinen ym. (2007) ovat esittäneet suometsien puulajikohtaisen pohjapinta-alan toimivan mahdollisena ennusteena maan CH₄-vuota ennustettaessa. Vaikkei sama menetelmä suoraan toimi puiden CH₄-vuon yleistämiseen metsikkötasolle, voisi samankaltaisten menetelmien arviointi olla hyödyllistä myös puiden CH₄-vuon yleistämisestä ajatellen. Jos tällainen yleistämismenetelmä olisi mahdollista kehittää, helpotuisi puiden CH₄-vuon huomioiminen metsikkötason CH₄-budjetissa. Myös pitkälle

kehittyneiden kaukokartoitusmenetelmien hyödyntäminen voi tarjota mielenkiintoisia mahdollisuuksia puiden CH₄-vuon arvioimisessa, kun vuon yhteys näillä menetelmillä mitattaviin puustotunnuksiin ymmärretään paremmin.

Puiden CH₄-dynamiikan selvittäminen ja vuohon vaikuttavien tekijöiden kartoittaminen vaatii runsaasti tutkimustyötä eri kasvupaikoilla ja puulajeilla. Boreaalinen kasvillisuusvyöhyke on jäänyt tähän asti vähälle huomiolle puiden CH₄-vuon tutkimuksessa. Tämä tutkimus osoitti, että CH₄-budjetin tarkennus vaatii boreaalisen vyöhykkeen puulajien huomioimisen, missä tarpeellista on myös puulajikohtaista metaanivuon tarkempi tuntemus eri kasvupaikoilla.

Kiitokset

Tämä pro gradu -työ tehtiin palkatussa työsuhteessa Helsingin yliopiston fysiikan laitoksen ilmakehätieteiden osastolla ja Suomen Akatemian ilmakehätieteiden huippuyksikössä. Kiitän huippuyksikköä ja fysiikan laitosta hyvistä työskentelyolosuhteista sekä Emil Aaltosen säätiötä ja Suomen Akatemiaa (294088) työn palkkauksesta. Suuret kiitokset Mari Pihlatielle ja Elisa Halmeenmäelle suuntaviivoista, kannustamisesta ja kaikesta avusta jota olen teiltä saanut tämän työn aikaansaamiseksi. Ohjauksessanne oleminen on ollut antoisampaa kuin olisin ikinä saattanut toivoa. Kiitos myös koko Hyytiälän metsäaseman väelle kaikesta mittauksiin ja tausta-aineiston koamiseen liittyvästä avusta. Tulevaa vaimoani Iinaa kiitän väsymättömästä tukena olemisesta ja rohkaisemisesta. Kaikkien mukana olleiden ihmisten luottamus minuun ja työhöni on ollut ehdottomasti tärkeimpiä voimavaroja matkan varrella.

Lähteet

- Apel, K. & Hirt, H. 2004. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology* 55(1): 373-399.
- Beerling, D. J., Gardiner, T., Leggett, G., McLeod, A. & Quick, W. P. 2008. Missing methane emissions from leaves of terrestrial plants. *Global Change Biology* 14(8): 1821-1826.
- Bloom, A. A., Lee-Taylor, J., Madronich, S., Messenger, D. J., Palmer, P. I., Reay, D. S. & McLeod, A. R. 2010. Global methane emission estimates from ultraviolet irradiation of terrestrial plant foliage. *New Phytologist* 187(2): 417-425.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J. et al. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. *Julkaisussa: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J. et al (toim.). Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the inter-governmental panel on climate change. Cambridge University Press, New York. s. 465-570.*
- Conrad, R. 2009. The global methane cycle: Recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environmental Microbiology Reports* 1(5): 285-292.
- Covey, K., Wood, S., Warren, R., Lee, X. & Bradford, M. 2012. Elevated methane concentrations in trees of an upland forest. *Geophysical Research Letters* 39
- De Simone, O., Müller, E., Junk, W. J. & Schmidt, W. 2002. Adaptations of central amazon tree species to prolonged flooding: Root morphology and leaf longevity. *Plant Biology* 4(4): 515-522.
- Ding, W., Cai, Z. & Tsuruta, H. 2005. Plant species effects on methane emissions from freshwater marshes. *Atmospheric Environment* 39(18): 3199-3207.
- Dueck, T. A., De Visser, R., Poorter, H., Persijn, S., Gorissen, A., De Visser, W. et al. 2007. No evidence for substantial aerobic methane emission by terrestrial plants: A ¹³C-labelling approach. *New Phytologist* 175(1): 29-35.

- Etheridge, D., Steele, L., Langenfelds, R., Francey, R., Barnola, J. & Morgan, V. 1998. Atmospheric methane between 100 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climate variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101(D13): 15979-15993.
- Etheridge, D., Steele, L., Langenfelds, R., Francey, R., Barnola, J. & Morgan, V. 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101(D2): 4115-4128.
- Evans, D. 2003. Aerenchyma formation. *New Phytologist* 161:35-49.
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., van Weele, M., Platt, U. & Wagner, T. 2005. Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science* 308(5724): 1010-1014.
- Gauci, V., Gowing, D. J., Hornibrook, E. R., Davis, J. M. & Dise, N. B. 2010. Woody stem methane emission in mature wetland alder trees. *Atmospheric Environment* 44(17): 2157-2160.
- Gaynard, T. & Armstrong, W. 1987. Some aspects of internal plant aeration in amphibious habitats. *Julkaisussa: Crawford, R.M.M., Hugh, D. & Spence, N. (toim.). Plant life in aquatic and amphibious habitats. 1. painos. Blackwell Scientific Publications, Oxford. s. 303-320.*
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree physiology* 3(4): 309-320.
- Greenup, A. L., Bradford, M. A., McNamara, N. P., Ineson, P. & Lee, J. A. 2000. The role of *Eriophorum vaginatum* in CH₄ flux from an ombrotrophic peatland. *Plant and Soil* 227(1): 265-272.
- Halmeenmäki, E. 2014. Metsänpohjan metaanivuon vaihtelu ja vuohon vaikuttavat tekijät boreaalisessa metsässä. Pro gradu Ympäristötieteiden laitos, Helsingin yliopisto, Helsinki.
- Hari, P. & Kulmala, M. 2005. Station for measuring ecosystem-atmosphere relations (SMEAR II). *Boreal Environment Research* 10:315-322.

- Hartmann, D., Tank, A., Rusticucci, M., Alexander, L., Brönnimann, S., Charabi, Y. et al. 2013. Observations: Atmosphere and surface. Julkaisussa: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J. et al (toim.). Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, New York. s. 159-254.
- Hölttä, T., Mäkinen, H., Nöjd, P., Mäkelä, A. & Nikinmaa, E. 2010. A physiological model of softwood cambial growth. *Tree physiology* 30(10): 1235-1252.
- Keppler, F., Hamilton, J. T. G., Braß, M. & Rockmann, T. 2006. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* 439(7073): 187-191.
- Keppler, F., Hamilton, J. T. G., McRoberts, W. C., Vigano, I., Braß, M. & Röckmann, T. 2008. Methoxyl groups of plant pectin as a precursor of atmospheric methane: Evidence from deuterium labelling studies. *New Phytologist* 178(4): 808-814.
- Kirschbaum, M. U. F., Bruhn, D., Etheridge, D. M., Evans, J. R., Farquhar, G. D., Gifford, R. M. et al. 2006. A comment on the quantitative significance of aerobic methane release by plants. *Functional Plant Biology* 33(6): 521-530.
- Laanbroek, H. J. 2010. Methane emission from natural wetlands: Interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes. A mini-review. *Annals of Botany* 105(1): 141-153.
- Laine, J. & Vasander, H. 2008. Suotyypit ja niiden tunnistaminen. 2. painos. Metsäkustannus Oy, Helsinki. 110 s.
- Le Mer, J. & Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* 37(1): 25-50.
- Lenhart, K., Bunge, M., Ratering, S., Neu, T. R., Schüttmann, I., Greule, M. et al. 2012. Evidence for methane production by saprotrophic fungi. *Nat Commun* 31046.
- Machacova, K., Papen, H., Kreuzwieser, J. & Rennenberg, H. 2013. Inundation strongly stimulates nitrous oxide emissions from stems of the upland tree *Fagus sylvatica* and the riparian tree *Alnus glutinosa*. *Plant Soil* 364: 287-301.

- Machacova, K., Bäck, J., Vanhatalo, A., Halmeenmäki, E., Kolari, P., Mammarella, I. et al. 2016. *Pinus sylvestris* as a missing source of nitrous oxide and methane in boreal forest (accepted to scientific reports). Scientific Reports
- Marklund, G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey Report 45:71 p.
- McLeod, A. R., Fry, S. C., Loake, G. J., Messenger, D. J., Reay, D. S., Smith, K. A. & Yun, B. 2008. Ultraviolet radiation drives methane emissions from terrestrial plant pectins. *New Phytologist* 180(1): 124-132.
- Megonigal, J. P. & Guenther, A. B. 2008. Methane emissions from upland forest soils and vegetation. *Tree physiology* 28(4): 491-498.
- Messenger, D. J., McLeod, A. R. & Fry, S. C. 2009. The role of ultraviolet radiation, photosensitizers, reactive oxygen species and ester groups in mechanisms of methane formation from pectin. *Plant, Cell & Environment* 32(1): 1-9.
- Minkinen, K., Penttilä, T. & Laine, J. 2007. Tree stand volume as a scalar for methane fluxes in forestry-drained peatlands in Finland. *Boreal Environment Research* 12:127-132.
- Mukhin, V. A. & Voronin, P. Y. 2011. Methane emission from living tree wood. *Russian Journal of Plant Physiology* 58(2): 344-350.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J. et al. 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. *Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, New York. s. 659-740.
- Nisbet, R. E. R., Fisher, R., Nimmo, R. H., Bendall, D. S., Crill, P. M., Gallego-Sala, A. V. et al. 2009. Emission of methane from plants. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 276(1660): 1347-1354.
- Nouchi, I., Mariko, S. & Aoki, K. 1990. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiology* 94(1): 59-66.

- Pangala, S. R., Hornibrook, E. R. C., Gowing, D. J. & Gauci, V. 2015. The contribution of trees to ecosystem methane emissions in a temperate forested wetland. *Global Change Biology* 21(7): 2642-2654.
- Pangala, S. R., Gowing, D. J., Hornibrook, E. R. C. & Gauci, V. 2014. Controls on methane emissions from *Alnus glutinosa* saplings. *New Phytologist* 201(3): 887-896.
- Pangala, S. R., Moore, S., Hornibrook, E. R. C. & Gauci, V. 2013. Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. *New Phytologist* 197(2): 524-531.
- Pedersen, A. R., Petersen, S. O. & Schelde, K. 2010. A comprehensive approach to soil-atmosphere trace-gas flux estimation with static chambers. *European Journal of Soil Science* 61(6): 888-902.
- Pihlatie, M. K., Christiansen, J. R., Aaltonen, H., Korhonen, J. F. J., Nordbo, A., Rasilo, T. et al. 2013. Comparison of static chambers to measure CH₄ emissions from soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 171–172: 124-136.
- Prather, M. J., Holmes, C. D. & Hsu, J. 2012. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters* 39(9):
- Repola, J. 2009. Biomass equations for scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625-647.
- Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605-624.
- Rice, A. L., Butenhoff, C. L., Shearer, M. J., Teama, D., Rosenstiel, T. N. & Khalil, M. A. K. 2010. Emissions of anaerobically produced methane by trees. *Geophysical Research Letters* 37(3): n/a-n/a.
- Rusch, H. & Rennenberg, H. 1998. Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) gaertn.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere. *Plant and Soil* 201(1): 1-7.
- Sundqvist, E., Crill, P., Mölder, M., Vestin, P. & Lindroth, A. 2012. Atmospheric methane removal by boreal plants. *Geophysical Research Letters* 39(21): n/a-n/a.

- Taiz, L. & Zeiger, E. 2010. Plant Physiology. 5. painos. Sinauer Associates Inc., Sun-derland, USA. 782 s.
- Terazawa, K., Yamada, K., Ohno, Y., Sakata, T. & Ishizuka, S. 2015. Spatial and temporal variability in methane emissions from tree stems of *Fraxinus mandshurica* in a cool-temperate floodplain forest. Biogeochemistry 123349-362.
- Terazawa, K., Ishizuka, S., Sakata, T., Yamada, K. & Takahashi, M. 2007. Methane emissions from stems of *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* trees in a floodplain forest. Soil Biology and Biochemistry 39(10): 2689-2692.
- Topp, E. & Pattey, E. 1997. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. Canadian Journal of Soil Science 77(2): 167-177.
- Wang, Z., Keppler, F., Greule, M. & Hamilton, J. T. G. 2011. Non-microbial methane emissions from fresh leaves: Effects of physical wounding and anoxia. Atmospheric Environment 45(28): 4915-4921.
- Yamamoto, F., Sakata, T. & Terazawa, K. 1995. Physiological, morphological and anatomical responses of *Fraxinus mandshurica* seedlings to flooding. Tree physiology 15(11): 713-719.
- Zeikus, J., C. & Ward, J., C. 1974. Methane formation in living trees: A microbial origin. Science 184(4142): 1181-1183.

Liitteet

Taulukko 5. Runkokammioiden metaanivoiden tilastollisia tunnuslukuja järjestettynä koealoittain ja kammioittain. Koeala MkK = metsäkortekorpi ja VT = kuivahko kangas. Kammiotunnukset: R1 = 1. kerroksen runkokammio, R2 = 2. kerroksen runkokammio ja R3 = 3. kerroksen runkokammio.

Koe-ala	Koepuun nro / Kammio	Puulaji	n	CH ₄ -vuo (µg h ⁻¹ m ⁻²)					
				Kes-kiarvo	Medi-aani	Min.	Max.	Alaneljännes	Yläneljännes
MkK	1 / R1	<i>B. pub.</i>	16	51,0	51,0	20,0	89,5	39,1	58,9
MkK	2 / R1	<i>B. pub.</i>	16	146	103	55,3	428	80,9	165
MkK	3 / R1	<i>P. abies</i>	16	0,824	0,704	0,225	2,15	0,342	0,952
MkK	4 / R1	<i>P. abies</i>	15	0,206	0,231	-0,805	1,06	0,132	0,284
MkK	1 / R2	<i>B. pub.</i>	13	0,397	0,198	-1,35	4,31	-0,0110	0,398
MkK	2 / R2	<i>B. pub.</i>	14	1,34	0,643	-0,250	6,46	0,474	1,46
MkK	3 / R2	<i>P. abies</i>	7	-0,237	-0,283	-1,23	0,574	-0,338	-0,0225
MkK	4 / R2	<i>P. abies</i>	5	-0,00380	0,140	-0,964	0,481	0,0570	0,267
MkK	1 / R3	<i>B. pub.</i>	7	0,295	0,269	-0,360	0,984	0,0645	0,520
MkK	2 / R3	<i>B. pub.</i>	8	0,322	0,109	-0,0730	1,16	0,0875	0,395
MkK	3 / R3	<i>P. abies</i>	5	1,27	0,480	-0,0420	4,55	0,318	1,05
MkK	4 / R3	<i>P. abies</i>	6	1,05	0,173	-0,791	6,49	0,0518	0,210
VT	5 / R1	<i>B. pen.</i>	4	-7,25	-0,550	-30,2	2,34	-8,55	0,752
VT	5 / R2	<i>B. pen.</i>	6	-1,56	0,531	-22,6	10,7	-0,706	2,15
VT	5 / R3	<i>B. pen.</i>	6	4,54	1,13	-0,973	17,4	0,0748	6,89

Taulukko 6. Oksakammioiden metaanivoiden tilastollisia tunnuslukuja järjestettynä koealoittain ja kammioittain. Koeala MkK = metsäkortekorpi ja VT = kuivahko kangas. Kammiotunnukset: OA = oksa A, OB = oksa B, OC = oksa C (kts. taulukko1).

Koe-ala	Koepuunro / Kammio	Puulaji	n	CH ₄ -vuo (µg h ⁻¹ g ⁻¹)					
				Kes-kiarvo	Medi-aani	Min.	Max.	Alaneljännes	Yläneljännes
MkK	1 / OA	<i>B. pub.</i>	13	0,00585	0,00300	-0,0390	0,0990	-0,00800	0,0120
MkK	2 / OA	<i>B. pub.</i>	15	0,0474	0,0160	-0,0100	0,320	0,00300	0,0645
MkK	3 / OA	<i>P. abies</i>	13	-0,00192	-0,00300	-0,0240	0,0170	-0,00700	0,00300
MkK	3 / OB	<i>P. abies</i>	13	0,101	0,00800	-0,00500	0,703	0,00300	0,0210
MkK	1 / OB	<i>B. pub.</i>	15	-0,00220	0,00100	-0,0250	0,0200	-0,0130	0,00600
MkK	2 / OB	<i>B. pub.</i>	13	0,00515	0,00300	-0,0110	0,0570	0,000	0,00700
MkK	4 / OA	<i>P. abies</i>	14	-0,0104	0,00200	-0,163	0,0100	0,000	0,00375
VT	5 / OA	<i>B. pen.</i>	5	0,0140	0,00100	-0,0460	0,115	-0,00800	0,00800
VT	5 / OB	<i>B. pen.</i>	6	0,0128	0,0155	-0,0140	0,0340	0,00100	0,0263
VT	5 / OC	<i>B. pen.</i>	6	0,0157	0,00750	-0,00200	0,0580	0,00325	0,0178